

Proyecto Fin de Grado  
Grado en Ingeniería de las Tecnologías  
Industriales

Análisis del comportamiento frente a cargas de  
impacto térmico de elementos de hormigón de ultra-  
alta resistencia

Autor: Carla Sanchís Pichardo  
Tutores: Héctor Cifuentes Bulté  
José David Ríos Jiménez

**Dpto. Mecánica de los Medios Continuos y  
Teoría de Estructuras  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla**





Proyecto Fin de Grado  
Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

# **Análisis del comportamiento frente a cargas de impacto térmico de elementos de hormigón de ultra-alta resistencia**

Autor:  
Carla Sanchís Pichardo

Tutores:  
Héctor Cifuentes Bulté  
Profesor Titular de Universidad

José David Ríos Jiménez  
Doctor Ingeniero Industrial

Dpto. de Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de Estructuras  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla  
Sevilla, 2019

Proyecto Fin de Carrera: Análisis del comportamiento frente a cargas de impacto térmico de elementos de hormigón de ultra-alta resistencia

Autor: Carla Sanchis Pichardo  
Tutor: Héctor Cifuentes Bulté  
José David Ríos Jiménez

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2019

El Secretario del Tribunal



*A mi familia por su apoyo  
A mis maestros por su ayuda  
y dedicación.*



# Agradecimientos

---

Me gustaría agradecer en primer lugar a mis tutores Héctor y José David, por guiarme durante este trabajo, por la ayuda y la dedicación que me han proporcionado a medida que se ha ido desarrollando el proyecto, y por supuesto por darme la posibilidad de realizar un trabajo práctico en el laboratorio, tan ansiado por los estudiantes de ingeniería. También agradecer la colaboración de Emilio, técnico de laboratorio, por la ayuda y atención recibida.

Además, me gustaría dar las gracias a mis padres por el apoyo incondicional y la motivación constante recibida, no solo durante este trabajo, sino a lo largo de todo el grado.



# Resumen

---

Este trabajo se centra en el análisis del comportamiento, tanto mecánico como de fractura de un hormigón de ultra-alta resistencia reforzado con fibras tras haberlo sometido a un choque térmico con el fin de evaluar el daño térmico que dicha variación de temperatura genera a escala microscópica, y cómo se manifiesta a escala macroscópica. Para ello, se llevarán a cabo una serie de ensayos tanto en hormigones reforzados con fibras (de acero y polipropileno) como en aquellos no reforzados, de manera que sirvan de referencia, permitiendo cuantificar el efecto de un impacto térmico sobre las propiedades mecánicas y de fractura. Gracias a que se dispone de los resultados de los mismos ensayos que se realizarán durante este proyecto sobre estos hormigones a temperatura ambiente y tras ser sometidos a un enfriamiento lento desde los 300 °C, realizados en trabajos previos por los tutores Héctor Cifuentes y José D. Ríos, se llevará a cabo un análisis comparativo de la influencia que el proceso de calentamiento-enfriamiento tiene sobre el comportamiento mecánico y de fractura de los hormigones de ultra altas prestaciones, pudiendo establecer una relación entre estos.

Los resultados ponen de manifiesto el daño térmico que supone una variación de temperatura tan brusca como es el impacto térmico. Las propiedades tanto mecánicas como de fractura sufren una considerable disminución con respecto a dichas propiedades tanto a temperatura ambiente como tras un enfriamiento lento. Esta disminución está directamente relacionada con la capacidad del hormigón para evacuar el vapor de agua que genera este aumento de temperatura, y por tanto depende principalmente de la porosidad del hormigón, de la que las fibras son las claras responsables. Las propiedades de fractura resultan ser, en términos relativos, mucho más afectadas que las propiedades mecánicas. No obstante, la simulación de un choque térmico en agua para hormigones reforzados con fibras ha supuesto un mejor resultado en términos de energía de fractura, frente un choque térmico realizado al aire, gracias a una mejor hidratación de la matriz que se traduce en una mejora de la ductilidad, y por tanto una mejora la energía de fractura residual, algo muy interesante de cara a la Protección Contra Incendios, ya que supondría una mayor resistencia tras la extinción de un incendio.



# Abstract

---

This work is focused on the analysis of both mechanical and fracture behavior of an ultra-high-performance fibre-reinforced concrete subjected to thermal shock in order to assess the thermal damage generated in the microscopic level and its connection with the macroscopic level. To this end, a series of tests will be carried out both on fibre-reinforced concretes (steel and polypropylene) and on un-reinforced concretes, used as reference material, to quantify the effects of thermal shock on the mechanical and fracture properties. An assessment of the mechanical and fracture properties results of the same concretes at room temperature and after being subjected to a slow cooling-down process from 300 °C have been performed. These tests were carried out in previous works by the tutors Héctor Cifuentes and José D. Ríos. An analysis of the influence of the heating-cooling process on the mechanical and fracture behavior of ultra-high-performance fibre-reinforced concretes was carried out. Finally, a comparative analysis between all the results has been established and a relationship between them can be established.

The results show the thermal damage caused by a sudden temperature change as the thermal shock is. The mechanical and fracture properties significantly decrease with respect to the room temperature and after slow cooling-down results. This decrease is directly related to the capability of the concrete to evacuate the water vapor generated by the increment of temperature, and thus it depends essentially of the porosity of concrete, of which the fibres are mainly responsible. The fracture properties are much more affected than the mechanical properties in relative terms. However, the simulation of the thermal shock in water for fibre-reinforced concrete has conducted to better results of fracture energy in comparison with those with a thermal shock made through the air cooling, thanks to a better hydration of the matrix that results in an improvement of the ductility, and therefore an enhancement of the residual fracture energy. This is very interesting for the Fire Protection, since it would suppose a higher strength after the extinction of a fire.





# Índice

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>vii</b>
<b>Resumen</b>	<b>ix</b>
<b>Abstract</b>	<b>xi</b>
<b>Índice</b>	<b>xiii</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>xv</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xvii</b>
<b>Notación</b>	<b>xix</b>
<b>1 Introducción y objetivos</b>	<b>1</b>
<b>2 Antecedentes</b>	<b>5</b>
2.1 <i>Introducción al hormigón de ultra alta resistencia</i>	5
2.2 <i>Adición de fibras al hormigón de ultra alta resistencia</i>	5
2.2.1 Fibras metálicas	5
2.2.2 Fibras de polipropileno	7
2.3 <i>Efectos de la temperatura</i>	8
2.4 <i>Impacto térmico</i>	9
<b>3 Programa experimental</b>	<b>11</b>
3.1 <i>Materiales</i>	11
3.2 <i>Fabricación del hormigón</i>	12
3.3 <i>Preparación de probetas</i>	14
<b>4 Ensayos</b>	<b>17</b>
4.1 <i>Impacto térmico</i>	17
4.2 <i>Ensayo de compresión simple</i>	19
4.3 <i>Ensayo de flexión en tres puntos</i>	23
<b>5 Resultados</b>	<b>30</b>
5.1 <i>Ensayo de compresión simple</i>	30
5.1.1 Resistencia a compresión	30
5.1.2 Módulo de Young	35

5.2	<i>Ensayo de flexión en tres puntos</i>	40
5.2.1	Energía de fractura	40
5.2.2	Resistencia a flexotracción	41
5.2.3	Resultados del ensayo de flexión en tres puntos	42
6	<b>Conclusiones</b>	<b>52</b>
7	<b>Desarrollos futuros</b>	<b>54</b>
8	<b>Anexo</b>	<b>56</b>
8.1	<i>Curvas ensayo de compresión simple</i>	56
8.1.1	Curvas tension-deformación ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) en probetas D0	56
8.1.2	Curva tensión-deformación $\sigma$ - $\epsilon$ en probetas DSLPP	57
8.2	<i>Curvas ensayo de flexion en tres puntos</i>	59
8.2.1	Curvas carga-flecha (P- $\delta$ ) en probetas D0	59
8.2.2	Curvas carga-flecha (P- $\delta$ ) en probetas DSLPP	61
	<b>Referencias</b>	<b>64</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 3.1 Materiales y composición del UHSFRC.....	12
Tabla 3.2 Dosificación de fibras en DSLPP. ....	12
Tabla 4.1. Resumen ensayos a realizar. ....	18
Tabla 5.1 Resultados de la resistencia a compresión en probetas cúbicas D0 .....	31
Tabla 5.2 Resultados de la resistencia a compresión en probetas cubicas DSLPP.....	31
Tabla 5.3 Resultados del Módulo de Young en probetas cúbicas D0.....	36
Tabla 5.4 Resultados del Módulo de Young en probetas cúbicas DSLPP. ....	36
Tabla 5.5 Variable de daño de E para D0.....	38
Tabla 5.6 Variable de daño de E para DSLPP. ....	38
Tabla 5.7 Resultados de la energía de fractura en probetas prismáticas D0. ....	42
Tabla 5.8 Resultados de la resistencia a flexotracción en probetas prismáticas D0. ....	43
Tabla 5.9 Resultados de la energía de fractura en probetas prismáticas DSLPP.....	43
Tabla 5.10 Resultados de la resistencia a flexotracción en probetas prismáticas DSLPP. ....	44



# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 2.1 Fibras de polipropileno. ....	7
Figura 3.1 Componentes del hormigón. ....	12
Figura 3.2. Mezclado de los componentes. (a) secos (b) añadidos agua y superplastificante.....	13
Figura 3.3 Amasado del hormigón tras los (a) veinte minutos y (b) treinta minutos aproximadamente de la adición de los componentes líquidos. ....	13
Figura 3.4 Adición de las fibras a la masa de hormigón. ....	14
Figura 3.5 Moldes para la fabricación de probetas. ....	15
Figura 4.1 Horno. ....	17
Figura 4.2. Baño de agua utilizado para enfriar las probetas. ....	18
Figura 4.3 Prensa hidráulica utilizada para el ensayo de compresión simple. ....	19
Figura 4.4 Probetas secas y lijadas para la colocación de bandas extensométricas. ....	21
Figura 4.5 Probeta con banda extensométrica colocada lista para ensayar. ....	21
Figura 4.6 Probeta D0 ensayada a compresión simple.....	22
Figura 4.7 Probeta DSLPP ensayada a compresión simple. ....	22
Figura 4.8. Esquema del ensayo de flexión en tres puntos. ....	23
Figura 4.9 Probetas instrumentadas.....	24
Figura 4.10. Transductores de pinza y LVTD.....	25
Figura 4.11. Máquina hidráulica con control en apertura de la boca de grieta. ....	25
Figura 4.12 Grieta producida en una probeta D0 en un ensayo de flexión en tres puntos. ....	25
Figura 4.13 Probetas D0 sometidas a choque térmico en agua tras el ensayo de flexión en tres puntos. ....	26
Figura 4.14 Probetas D0 sometidas a choque térmico en aire tras el ensayo de flexión en tres puntos. ....	26
Figura 4.15. Máquina hidráulica con control en desplazamiento. ....	27
Figura 4.16. Transductores de pinza y LVDT en una probeta DSLPP. ....	27
Figura 4.17 Grieta producida en una probeta DSLPP en un ensayo de flexión en tres puntos. ..	27
Figura 4.18 Probetas DSLPP tras el ensayo de flexión en tres puntos. ....	28
Figura 5.1 Resistencia a compresión D0. ....	33

Figura 5.2 Resistencia a compresión de DSLPP. ....	34
Figura 5.3 Gráficas $\sigma$ - $\epsilon$ del ensayo de compresión (a) sin modificar y (b) modificada. ....	35
Figura 5.4 Módulo de Young D0. ....	39
Figura 5.5 Módulo de Young DSLPP.....	39
Figura 5.6 Gráficas P- $\delta$ de ensayo de flexión en tres puntos (a) sin modificar, y (b) corregida. .	41
Figura 5.7 Energía de fractura D0. ....	45
Figura 5.8 Resistencia a flexotracción D0.....	46
Figura 5.9 Probeta ensayada tras el efecto del choque térmico realizado en agua (a) planta, (b) perfil.....	46
Figura 5.10 Curvas P- $\delta$ de un hormigón reforzado con fibras metálicas a (a) temperatura ambiente y (b) 300 °C. Fuente: Ríos et al, 2018. ....	48
Figura 5.11 Curvas P- $\delta$ de hormigones de ultra-alta resistencia reforzados con fibras de polipropileno de distintas longitudes a (a) temperatura ambiente, (b) 100°C, (c) 300°C, (d) 500°C. Fuente: Cifuentes et al, 2011. ....	48
Figura 5.12 Energía de fractura DSLPP. ....	50
Figura 5.13 Resistencia a flexocompresión DSLPP .....	50

# Notación

---

UHSC	Hormigón de ultra-alta resistencia
UHSFRC	Hormigón de ultra-alta resistencia reforzado con fibras
D0	UHSC
DSLPP	UHSC reforzado con fibras metálicas y de polipropileno
PP	Polipropileno
$\phi$	Diámetro
CMOD	Crack Mouth Opening Displacement
LVDT	Linear Variable Displacement Transducer
$G_F$	Energía de fractura
$F_{cf}$	Resistencia a flexotracción
$F_c$	Resistencia a compresión
$E$	Módulo de Young
$P - \delta$	Curva carga-flecha
$\sigma - \varepsilon$	Ley tensión-deformación
$\omega_i$	Variable de daño
$\delta_u$	Deformación última





# 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

---

Los hormigones de ultra alta resistencia reforzados con fibras, más conocidos en el ámbito científico por su designación inglesa como Ultra-High-Strength Fiber-Reinforced Concrete (UHSFRC), están resultando de gran aplicación en la actualidad gracias a que presentan una significativa mejora en las propiedades mecánicas respecto a los hormigones convencionales. La adición de fibras a los hormigones de ultra alta resistencia hace que éstos sean capaces de alcanzar una resistencia a compresión de hasta 250 MPa [1][2], lo que supone un aumento de aproximadamente 5 veces más con respecto a un hormigón convencional [3]. Del mismo modo se produce un aumento de la resistencia a flexotracción, en la que se pueden obtener valores cercanos a los 30 MPa. Ésto es, sin duda, en términos relativos el logro más significativo conseguido en este tipo de hormigones, ya que este aumento supone una repercusión de gran importancia en la resistencia a tracción, que no será de ahora en adelante despreciable, sino que deberá ser tomada en cuenta de manera favorable a la hora del diseño de estructuras [4]. Esta alta capacidad de deformación a tracción se traduce también en una mejora de la ductilidad durante el comportamiento plástico del hormigón [5]. Todo ello está dando lugar al uso de este tipo de hormigón en el mundo de la construcción, ya que con él se pueden lograr estructuras cada vez más resistentes a la par que livianas, además de asegurar una mayor durabilidad.

La adición de fibras metálicas al hormigón juega un importante papel en la mejora de las propiedades de los UHSFRC previamente nombradas. A diferencia de lo que se pudiera esperar, la adición de fibras metálicas durante el amasado provoca que éstas actúen como pequeñas palas que mueven la mezcla dando como resultado una considerable reducción de la porosidad del hormigón final [5]. Esto da lugar a una mezcla de alta densidad, mejorando por tanto su resistencia y durabilidad [6]. Para conseguir esta alta resistencia y compacidad, el contenido en fibra de la mezcla debe ser superior al 2% en volumen según mostró Hwang et al. [7] en su estudio sobre la porosidad generada por las fibras de acero en el hormigón [7].

No obstante, todas estas mejoras se ven algo truncadas cuando los hormigones se ven sometidos a temperatura. Como ya se sabe, la temperatura es una variable de gran importancia para los materiales, y por tanto para el cálculo de estructuras. Todas las estructuras están sometidas a variaciones de temperatura, ya que el mero cambio de estación supone una alteración significativa para éstas, por no hablar de la resistencia al fuego mínima que se debe asegurar en todo tipo de estructuras por normativa en caso de que se produzca un accidente. Es por ello por lo que el factor temperatura supone una cuestión de gran importancia, y no se puede dejar de lado.

En estudios previos en los que se ha analizado este tipo de situaciones, como el estudio realizado por Ríos et al. [3], se ha llegado a la conclusión de que en este tipo de hormigones la reducción de la porosidad, que suponía una mejora en las propiedades mecánicas a temperatura ambiente, no resulta en absoluto favorable de cara a los incrementos de temperatura. Al aumentar la temperatura, el agua que contiene el hormigón se evapora y por tanto debe ser evacuada. La reducción del número de poros dificulta esta tarea, por lo que este vapor de agua, que no abandona el hormigón generará una serie de presiones internas dando como resultado un material más frágil, y por tanto menos resistente, en el que incluso se puede llegar a producir el fenómeno denominado como *spalling* (rotura explosiva) [8][9][10][11]. No obstante, aunque un aumento de la temperatura resulte más desfavorable, en términos relativos, en los hormigones reforzados con fibras que en los que no están reforzados, las propiedades de los primeros continúan siendo mejores, por lo que sigue mereciendo la pena el estudio de la temperatura en ellos, con el fin de encontrar cuáles son los principales factores que provocan ese empeoramiento de las propiedades, de manera que se pueda caracterizar el comportamiento de éstos a temperatura, pudiendo así no descartarlos como material a utilizar en aplicaciones en las que la temperatura está implícita.

Basándonos en las evidencias expuestas, este trabajo tendrá como objetivo el estudio de la influencia de la temperatura en los hormigones de ultra alta resistencia reforzados con fibras. Para ello se ha decidido analizar el choque térmico en este tipo de hormigones, como un caso extremo de variación de temperatura, siendo además una situación perfectamente factible en la realidad, como podría ser un incendio. Es bien sabido que la velocidad de variación de temperatura tiene un efecto directo en las propiedades mecánicas del material. En este estudio se pretende comparar esta situación con los ensayos realizados en los que las velocidades de calentamiento y enfriamiento son mucho más lentas que las que se llevarán a cabo para simular un choque térmico. Salvando las distancias, este proyecto pretende complementar los estudios ya realizados por los tutores sobre esta materia, por lo que para ello se harán referencia a dichos estudios, así como se intentará en la medida de lo posible ser fiel a los procedimientos utilizados de manera que las comparaciones sean lo más rigurosas posibles.

No obstante, ya que partimos de estudios realizados sobre temperatura, se ha decidido experimentar con hormigones de ultra alta resistencia reforzados con fibras de acero, al que se le añadirá también fibras de polipropileno (PP). El motivo de esto es que ya se sabe que el refuerzo del hormigón con fibras metálicas no conduce a buenos resultados frente a incrementos de temperatura de 300 °C, ya que la baja porosidad impide la evacuación del agua y produce el desconchamiento por explosión del material. Sin embargo, en el caso de las fibras de polipropileno ocurre lo contrario. Según el estudio realizado por Cifuentes et al. [12] las fibras de polipropileno son más sensibles a la temperatura, fundiéndose a una temperatura de 170 °C aproximadamente. A medida que se funden, comienza a desaparecer la unión existente entre éstas y el hormigón (que proporcionaban la mejora en las propiedades mecánicas, que por tanto se perderá), cediendo parcialmente el espacio que ocupaban a una red de canales por los que el vapor de agua encuentra una vía de salida del hormigón, evitando la acumulación de presiones

internas provocadas por dicho vapor, y con ello todos sus efectos negativos como se ha comentado previamente.

Se define por tanto el principal objetivo de este trabajo como la caracterización del comportamiento mecánico y de fractura de un hormigón de ultra altas prestaciones reforzado con fibras de acero y polipropileno tras haberlo sometido a un choque térmico, con el fin de determinar el daño que genera la temperatura a nivel interno en el hormigón.

El trabajo está estructurado en seis capítulos, de los que se hace un breve resumen a continuación:

En el segundo capítulo se realiza una presentación del hormigón de ultra alta resistencia, las prestaciones que ofrece respecto al hormigón convencional, con qué criterios se realiza la adición de fibras y qué mejoras suponen. Se explica de manera breve cómo afecta la temperatura en el hormigón de ultra alta resistencia, y la casuística del choque térmico.

En el tercer capítulo se presenta el programa experimental que se ha llevado a cabo en el laboratorio, tanto los materiales empleados en su fabricación, como la propia fabricación del hormigón, el amasado, el relleno de moldes para la configuración de las probetas, y el posterior curado de éstas.

El cuarto capítulo hace referencia a los ensayos realizados. Se explica en primer lugar como se ha realizado el choque térmico en las probetas, y se muestra un esquema de todos los ensayos que se han llevado a cabo. Se mostrará de manera breve, para cada ensayo, en qué consiste, que equipos de ensayo se han utilizado y que datos obtendremos con la realización del ensayo.

En el quinto capítulo se mostrarán todos los resultados obtenidos. Se procederá a un análisis de todos ellos, al mismo tiempo que se realizará una comparativa de los datos de los que ya se disponen. Esta comparativa se expresará de manera más clara y concisa en el capítulo sexto, donde se anunciarán las conclusiones obtenidas tras la realización del proyecto. Por último, se incluye un capítulo final donde se presentarán una serie de posibles investigaciones que podrían ser llevadas a cabo con el fin de profundizar en este tema, además de obtener una mayor información con la que contrastar las conclusiones obtenidas.



## 2 ANTECEDENTES

---

### 2.1 Introducción al hormigón de ultra alta resistencia

Como se ha avanzado previamente, el hormigón de ultra alta resistencia, gracias a su composición, presenta una mejora muy significativa en su comportamiento mecánico, en términos de compresión, flexión y durabilidad, que nada tienen que ver con los hormigones convencionales[1][2][4][13]. No obstante, esta mejora en el comportamiento mecánico pasa factura en la fragilidad del material, ya que, aunque ofrece una resistencia más alta, la ductilidad y deformabilidad disminuyen en gran medida, presentando además un comportamiento más explosivo, consecuencia directa de una mayor fragilidad [14]. Es por esto por lo que se recurre al refuerzo del hormigón de ultra alta resistencia con fibras, que además de otras muchas ventajas, dotan al hormigón de la capacidad de deformabilidad perdida, además de una mejora tan valiosa en la resistencia a tracción, ya que permite no despreciarla como se solía hacer dado su pequeño valor.

Es por ello por lo que el uso de este tipo de hormigones en obras civiles, gracias a las altas prestaciones que ofrece, resulta muy atractivo. A pesar de las ventajas que proporciona, su uso aumenta el coste de una manera considerable respecto a los hormigones convencionales. Esto hace que se haya generado un creciente interés por caracterizar su comportamiento, y con ello un aumento de las investigaciones llevada a cabo en esta materia, con el fin de optimizar todo lo posible los materiales empleados y sus dosificaciones, de modo que su uso sea justificable en una mayor medida.

### 2.2 Adición de fibras al hormigón de ultra alta resistencia

Analizaremos un poco más a fondo la adición de fibras al UHSC. En nuestro caso, las fibras añadidas a nuestra dosificación de hormigón serán de dos tipos, fibras de acero y fibras de polipropileno.

#### 2.2.1 Fibras metálicas

Las fibras metálicas se añaden al hormigón con el fin de aumentar su capacidad portante, mejorando como ya se ha indicado previamente la ductilidad y deformabilidad de la mezcla.

Además, en términos generales tienen la capacidad de reducir la porosidad, ralentizando al máximo la propagación de grietas [14].

Existen gran cantidad de tipos de fibras de acero, y el uso de éstas queda recogido en la norma UNE EN 14889-1:2008 [15]. La norma clasifica las fibras según su material base y según su forma. Según su material base, concreta cinco grupos a los que pueden pertenecer: alambres estirados en frío (Grupo I), láminas cortadas (Grupo II), extractos fundidos (Grupo III), conformados en frío (Grupo IV) y aserrados de bloques de hacer (Grupo V). Con respecto a la forma, las fibras pueden ser rectas o deformadas, como se puede apreciar en las Figuras 2.1 y 2.2. La longitud de las fibras se estipula generalmente entre 2,5 y 3 veces el tamaño máximo del árido, nunca siendo menor que dos veces el tamaño de dicho árido según se explica en la EHE-08 [16], siempre que sea suficiente para proporcionar la adherencia necesaria evitando el arrancamiento. Con respecto al diámetro, con la misma longitud, un menor diámetro de fibra conllevará un mayor número de fibras, con la misma dosificación, lo que generará una matriz más compacta que será capaz de distribuir las cargas soportadas de manera más uniforme.



Figura 2.1 Fibras de acero rectas.  
Fuente: Google.



Figura 2.2 Fibras de acero deformadas.  
Fuente: Google.

Sobre la forma de las fibras, se ha de decir que las fibras rectas mejoran el comportamiento de la matriz al reducir la porosidad, y evitan en mayor medida la fisuración lo que permite alcanzar mayores cargas, mientras que las fibras que presentan los extremos inclinados respecto a la horizontal proporcionan una mejor adherencia a la matriz de hormigón, aumentando la capacidad de deformación [14]. Es por ello por lo que la utilización de una u otra, o la mezcla de las dos, como es en el caso de este trabajo experimental, dependerá de la aplicación.

### 2.2.2 Fibras de polipropileno

Las fibras de polipropileno no aportan resistencia alguna al hormigón, sin embargo, si son muy beneficiosas a la hora de evitar las microfisuras que puedan aparecer por la contracción plástica sufrida antes de que se alcance el endurecimiento del hormigón, y las que pudieran aparecer en el secado que ocurre tras dicho endurecimiento. Del mismo modo, mejoran la durabilidad del hormigón ya que previenen la corrosión [17]. Sin embargo, el principal beneficio de las fibras de polipropileno se manifiesta a altas temperaturas, en las que su presencia es realmente notable. Las fibras de polipropileno según un estudio realizado por Cifuentes et al. [3] en el que se analiza el efecto de la temperatura hormigón reforzado con fibra de polipropileno, generan una red de conductos por las que el vapor de agua generado a causa de la temperatura puede desplazarse hasta encontrar la salida en el exterior, de manera que se eviten en cierto modo las presiones que este vapor de agua causaría si quedara retenido en la matriz.

Las fibras de polipropileno están clasificadas según la norma UNE EN 14889-2:2008 [18] en tres tipos: Clase Ia (micro fibras de diámetro menor de 0,30 milímetros, mono-filamentosas), Clase Ib (micro fibras de diámetro menor de 0,30 milímetros, fibrilosas) y Clase II (macro fibras de diámetro mayor de 0,30 milímetros). En la figura 2.3 se puede apreciar el aspecto de las fibras de polipropileno, que son como finos hilos que se deshacen en la matriz de hormigón una vez añadidos, y que son prácticamente imperceptibles una vez se haya realizado el amasado.



Figura 2.1 Fibras de polipropileno.  
Fuente: Google.

## 2.3 Efectos de la temperatura

La baja porosidad que se consigue en los hormigones de ultra alta resistencia supone un empeoramiento de las propiedades con la temperatura, ya que se trata de materiales densos y poco permeables [17]. En el trabajo realizado por Ríos et al. [3] se profundiza en lo que ocurre cuando se aumenta la temperatura de un hormigón de ultra alta resistencia.

Durante el calentamiento progresivo de los UHSC se produce una pérdida de masa a causa de la deshidratación que sufre el hormigón. Esta pérdida de masa puede dividirse en dos etapas. La primera etapa, en la que se produce una mayor pérdida que en la segunda (alrededor de un 4,5 % en peso), tendrá lugar entre los 50 y los 250 °C, y será consecuencia de la pérdida de humedad que tenga la matriz, así como por la evaporación del agua que se encuentra en los poros más pequeños. La segunda etapa se desarrollará entre los 250 y los 300 °C, y estará causada por la deshidratación del gel C-S-H, suponiendo una pérdida de masa de un 2,5% en peso [3].

Durante estos procesos de pérdida de masa a causa de las deshidrataciones mencionadas en el párrafo anterior, se generan una serie de presiones internas que suponen una situación desfavorable para la densa matriz de hormigón, afectando a los poros hasta el punto de poder ocasionar una rotura explosiva (*spalling*)[19]. Esta rotura explosiva se puede ver afectada también por otro fenómeno que ocurre a causa de un calentamiento. El aumento de temperatura genera un incremento de la porosidad lo que se traduce en una disminución de la conductividad del material, que dará lugar a un gradiente térmico más acusado, y que por tanto provocará un aumento de las presiones internas.

El hormigón reforzado con fibras metálicas es el principal afectado a causa de la temperatura. Aunque la adición de estas fibras reduce la porosidad, los poros que se generan, lo hacen bajo las fibras como pequeñas burbujas de aire, por lo que su morfología será más irregular que la de los poros que aparecen en el hormigón sin fibra [5]. Esta baja esfericidad natural que se produce en los hormigones reforzados con fibras metálicas a temperatura ambiente resulta aún más desfavorable a la hora de soportar las presiones internas que son consecuencia de la temperatura. Además, un aumento de temperatura también supondrá una deshomogenización de la porosimetría en los hormigones reforzados con fibras metálicas[3].

El refuerzo del hormigón con fibras de polipropileno, sin embargo, solo supone mejoras en el hormigón bajo los efectos de la temperatura. Además de permitir la evacuación del vapor de agua generado a causa de la temperatura, un estudio realizado por Cifuentes et al. [12] ha puesto de manifiesto el aumento de la energía de fractura residual de los hormigones de alta resistencia reforzados con fibra de polipropileno tras estar expuestos a altas temperaturas, lo que resulta ser de gran importancia en las estructuras, ya que tras un incendio, se podría evitar la demolición



de esta, pudiendo únicamente restaurarla, evitando posiblemente una pérdida económica aun más importante.

## 2.4 Impacto térmico

El fenómeno de impacto térmico está directamente relacionado con un incendio, ya que, durante éste, se produce una variación de la temperatura de una manera brusca y rápida, a la que, además, cualquier estructura puede estar expuesta, por lo que resulta un problema de gran interés en muchos ámbitos. Aunque esta sea la principal circunstancia en la que un choque térmico que se pueda producir también existen otras circunstancias, en las que además el medio por el cual se produzca el choque térmico no sea el agua, como ocurre en el caso de un incendio. Existen edificios de contención que albergan procesos a altas temperaturas, depósitos de sal fundida o de vapor, así como sistemas de almacenamiento de energía en los que estas estructuras de hormigón estarán expuestas a altas temperaturas durante un periodo de tiempo, para luego cuando el proceso cese, o se extraiga la materia que tiene dentro, estén sometidos a una temperatura igual a la temperatura ambiente, que dependiendo de la localización de la estructura puede ser mayor o menor que a la que se sometería al apagar un incendio con agua, resultando otro tipo de choque térmico. En estos casos, además interviene el factor repetición, en el que los cambios de temperatura son cíclicos, y pueden provocar la fatiga del material, suponiendo un problema añadido al de la temperatura, agravando aún más la situación.

Es por ello, que en este trabajo se van a recrear dos tipos de impacto térmico tras el calentamiento del hormigón, mediante la inmersión en agua, y sometiéndolo a temperatura ambiente, de manera que se recreen ambos tipos de situaciones, aunque principalmente se pretende analizar la situación de un incendio, y poder comparla con otro tipo de situaciones es los que un choque térmico pueda tener lugar.

Los cambios bruscos de temperatura suponen un cambio tanto físico como químico en el hormigón. Cabe esperar que, ya que este cambio de temperatura es más severo, los fenómenos que se han experimentado en los ensayos realizados de los hormigones a temperatura sean aún más acusados, además de inestables. La necesidad de caracterizar el comportamiento de hormigón de ultra alta resistencia frente a un impacto térmico reside principalmente en conocer como se puede evitar el ya nombrado desconchamiento explosivo (*explosive spalling*), ya que entonces el único daño que ocurriría tras la extinción de un incendio sería una pérdida de resistencia [20], y no un colapso de la estructura que podría provocar la pérdida de vidas humanas.

Es por ello por lo que el impacto térmico supone un punto clave en el estudio de la temperatura en un material, tanto para caracterizar los efectos que puede tener sobre este, como para determinar la aleatoriedad de estos.



## 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

En este capítulo se van a introducir los materiales empleados en la fabricación del hormigón a estudiar, así como su dosificación. Del mismo modo se explicará de manera breve el proceso de amasado del hormigón y la fabricación de las probetas de ensayo que ha sido llevado a cabo en el laboratorio del Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla.

### 3.1 Materiales

Para conseguir hormigones de ultra alta resistencia es necesario que la relación agua/cemento existente sea aproximadamente 0.2 para poder reducir el exceso de agua y así lograr la mayor densidad posible una vez haya endurecido el hormigón. Esta relación agua/cemento tan reducida se consigue gracias al uso de un aditivo superplastificante, que además de reducir la demanda de agua de la mezcla, dota a ésta de una buena fluidez, permitiendo la buena trabajabilidad del hormigón en estado fresco. En nuestro caso se utilizará el superplastificante MasterGlenium ACE 325. También resulta de gran importancia el tamaño del árido, que debe ser fino, ya que también reduce la demanda de agua, aumentando el rozamiento. En nuestro caso el diámetro máximo no superará los 0.800 mm.

Para la fabricación de los hormigones de ultra alta resistencia se ha utilizado como componentes activos un cemento Portland tipo I 52.5-R/SR proporcionado por la empresa Portland Valderribas, humo de sílice con un 98% de sílice y escoria de alto horno, ambas proporcionadas por Arcelor (España). El humo de sílice favorecerá la durabilidad del hormigón dotándolo de una alta resistencia a la abrasión, además de una baja permeabilidad, ya que actúan como *filler* ocupando los espacios vacíos que existan en la pasta. Tanto el humo de sílice como la escoria de alto horno se añadirán sustituyendo una parte del cemento para reducir los efectos de retracción en el hormigón debido a la alta cantidad de cemento.

En cuanto a los áridos que constituirán el hormigón de ultra alta resistencia se utilizará arena silíceas con dos tipos de distribución granulométrica diferente, el primero, será una

arena silíceas con tamaño de partícula inferior a 0.315 mm y, el segundo, una arena silícea con tamaños de partículas inferiores a 0.800 mm. Las cantidades utilizadas de cada material se encuentran en la Tabla 3.1. Del mismo modo, en la Figura 3.1 se pueden observar todos los componentes indicados en la Tabla 3.1, ya pesados y listos para la fabricación del hormigón.

Tabla 3.1 Materiales y composición del UHSFRC.

Componente	kg/m <sup>3</sup>
Cemento (c)	544
Humo de Sílice	214
Escoria de alto horno	312
Agua (a)	188
Arena fina (>315µm)	470
Arena gruesa	470
Súper plastificante	42
a/c	0.34



Figura 3.1 Componentes del hormigón.

- |                          |                             |
|--------------------------|-----------------------------|
| 1. Árido grueso          | 6. Agua                     |
| 2. Árido fino            | 7. Superplastificante       |
| 3. Cemento               | 8. Fibras cortas            |
| 4. Humo de sílice        | 9. Fibras largas            |
| 5. Escoria de alto horno | 10. Fibras de polipropileno |

Con esta dosificación se prepararán dos tipos de hormigones, que solo diferirán en la adición de fibras. Se denominará como D0 al hormigón carente de fibra, que se utilizará como referente en los ensayos, y DSLPP al hormigón reforzado con éstas. Estos hormigones tendrán la misma composición que los ensayados previamente en el laboratorio, ya que como se ha señalado con anterioridad, este trabajo pretende complementar en cierto modo a los estudios ya realizados.

Para la mezcla reforzada con fibras, DSLPP, se utilizarán tanto fibras de acero como fibras de polipropileno (PP). Son muchos los factores que influyen a la hora de añadir las fibras, como cantidad, longitud, espesor, etc. [21][22] No obstante, ya que el objetivo de este trabajo reside principalmente en el efecto que tiene sobre las propiedades mecánicas un enfriamiento brusco, se han seleccionado estos parámetros según las conclusiones obtenidas en trabajos previos por Ríos et al. [5].

Se ha tomado la decisión de utilizar tanto las cantidades como los tipos de fibra que mejor resultado han dado en base a los experimentos realizados. En el caso de las fibras de acero se utilizará una combinación de dos tipos de fibra, fibra larga y fibra corta. Se denominarán como cortas a las fibras rectas de 13 mm de longitud y 0.20 mm de diámetro, mientras que nos referiremos a las fibras de longitud 30 mm y de diámetro 0.38 mm cuyos extremos se encuentran inclinados, como fibras largas. El motivo por el cual se ha tomado la decisión de utilizar una combinación de ambos tipos de fibras es que, aunque las fibras cortas den un mejor resultado frente a la resistencia a flexotracción, estas tienen un elevado coste, que se puede evitar sustituyendo la mitad de las fibras cortas añadidas por fibras largas sin que las consecuencias en las propiedades mecánicas sean tan drásticas, mejorando éstas además la adherencia al hormigón gracias a sus extremos inclinados [5].

Las fibras de polipropileno tendrán una longitud de 24 mm. La elección de este tamaño de fibras es debido a las conclusiones obtenidas por Cifuentes et al.[12]. Como se ha comentado con anterioridad las fibras de PP al fundirse crean unos canales por los que el vapor de agua generado a causa del aumento de temperatura puede ser evacuado, de modo que mientras más largas sean las fibras, mejores serán los canales que se formarán. Esta longitud fue la más larga ensayada, y por tanto la que mejores resultados proporcionó [12].

Como ya se ha avanzado en la introducción, la adición de fibras metálicas debe superar el 2% en volumen a fin de producir una mejora significativa en las propiedades del hormigón convencional. En nuestro caso se han añadido un 2,5% v/v. Ya que se dispone de dos tipos de

fibras, ambas compondrán un 50% de dicha fracción. En el caso de las fibras de polipropileno, su contenido será menor. Las cantidades están especificadas en la siguiente Tabla 3.2:

Tabla 3.2 Dosificación de fibras en DSLPP.

Tipo de fibra	kg/m <sup>3</sup>
Microfibras	196
Macrofibras	196
Fibras de polipropileno	1,2

### 3.2 Fabricación del hormigón

Ambas mezclas, D0 y DSLPP, serán preparadas en una hormigonera vertical donde se irán añadiendo en primer lugar los materiales secos, alternando los más gruesos con los más finos, empezando por el árido grueso y por el cemento. Se mezclarán todos los materiales durante 5 minutos hasta la adición del agua (Figura 3.2). para asegurar una mezcla homogénea, el agua irá mezclada junto con el superplastificante. Una vez añadidos todos lo materiales, la mezcla estará amasando entre 30 y 40 minutos, hasta observar una pasta de hormigón fresco fluida. Una vez haya transcurrido este tiempo, en el caso del hormigón reforzado (DSLPP), se añadirán las fibras y se continuará mezclando durante al menos 10 minutos más (Figura 3.4). En las siguientes figuras se puede observar el efecto del superplastificante, ya que en el momento de añadir éste junto con el agua dará la sensación de no haber añadido líquido alguno, y no es hasta al menos 20 o 25 minutos más tarde cuando comenzará a apreciarse su efecto, ya que la mezcla pasará a tener el aspecto propio del hormigón fresco (Figura 3.3).



(a)



(b)

Figura 3.2. Mezclado de los componentes. (a) secos (b) añadidos agua y superplastificante.



(a)



(b)

Figura 3.3 Amasado del hormigón tras los (a) veinte minutos y (b) treinta minutos aproximadamente de la adición de los componentes líquidos.





Figura 3.4 Adición de las fibras a la masa de hormigón.

### 3.3 Preparación de probetas

Con cada mezcla se procederá al llenado de ocho probetas prismáticas, previamente engrasadas, de  $100 \times 100 \times 440 \text{ mm}^3$ , seis probetas cúbicas de  $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$  y dos probetas cilíndricas de  $\Phi 100 \times 200 \text{ mm}^3$  como se puede observar en la Figura 3.5. Todos los moldes presentan las dimensiones normalizadas indicadas en la norma UNE EN 12390-1[23]. Las probetas serán desmoldadas pasadas 24 horas, para su posterior curado en agua a  $60^\circ\text{C}$  durante 28 días. La razón por la cual se ha realizado el curado a dicha temperatura y no a  $20^\circ\text{C}$ , temperatura normalizada que indica la norma UNE EN 12390-2[24], es debido a que de este modo se consigue un aumento de la resistencia del hormigón por una mejora de las reacciones de curado.





Figura 3.5 Moldes para la fabricación de probetas.



## 4 ENSAYOS

Con el fin de caracterizar las propiedades mecánicas del hormigón de ultra alta resistencia sometido a un choque térmico se van a llevar a cabo dos ensayos. El primer ensayo será el de compresión simple, el cual se realizará sobre las probetas cúbicas, y cuyo objetivo es obtener la resistencia a compresión y el módulo de Young. El segundo ensayo que se realizará será el ensayo de flexión en tres puntos, sobre probetas prismáticas entalladas, para la determinación de la energía de fractura y la resistencia a flexotracción.

### 4.1 Impacto térmico

Antes de realizar los ensayos, es necesario conseguir simular en las probetas un impacto térmico, y para ello, lo primero es calentarlas. El calentamiento de las probetas se realizará en el horno de manera progresiva, ya que como se ha mencionado previamente, los hormigones de ultra alta resistencia presentan un comportamiento más frágil en comparación a los hormigones convencionales como consecuencia de una disminución en su porosidad, y por tanto un calentamiento brusco puede incentivar que el hormigón sufra *spalling* y no nos permita realizar los ensayos correctamente. Es por ello por lo que se incrementará la temperatura de las probetas a razón de 100 °C hasta llegar a 300 °C, nuestra temperatura objetivo. Cada salto de temperatura se mantendrá durante 24 horas, de manera que el tiempo de calentamiento total de una probeta será de aproximadamente tres días. Las dimensiones del horno permitirán calentar seis probetas cúbicas o cuatro probetas prismáticas a la vez, por lo que será necesario realizar varias tandas de calentamiento.



Figura 4.1 Horno.

Para provocar el choque térmico en las probetas, se plantearán dos posibles situaciones. La mitad de las probetas se dejarán enfriar al aire, lo que supone someterlas tras el calentamiento a una temperatura de aproximadamente 25°C, y la otra mitad de las probetas se sumergirán en un baño de agua, cuya temperatura es de unos 17°C. De este modo también podremos realizar una comparativa entre los dos tipos de choque térmico recreados, los cuales podrían representar situaciones de aplicación real. Por ejemplo, una estructura que albergara un proceso a altas temperaturas puede encontrarse a la intemperie, o puede verse afectado por la lluvia, de forma que las dos situaciones serán representativas de la realidad, además de la situación más recurrente que se ha mencionado previamente, como es un incendio.



Figura 4.2. Baño de agua utilizado para enfriar las probetas.

Una vez sometidas a las probetas al choque térmico, se procederá a la realización de los ensayos. En la Tabla 4.1 se muestra de manera resumida el programa experimental:

Tabla 4.1. Resumen ensayos a realizar.

	ENFRIADAS AL AIRE	ENFRIADAS AL AGUA
ENSAYO DE COMPRESIÓN	3 D0	3 D0
	3 DSLPP	3 DSLPP
ENSAYO DE FLEXIÓN EN TRES PUNTOS	4 D0	4 D0
	4 DSLPP	4 DSLPP

## 4.2 Ensayo de compresión simple

El ensayo de compresión simple se realizará según lo indicado en la norma EN 12390-3:2009 [25], con la finalidad de obtener los datos para calcular la resistencia a compresión y el módulo de Young. Este ensayo se realizará sobre las probetas cúbicas ( $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$ ). El ensayo se llevará a cabo en una prensa hidráulica modelos MES 300 de Servosis, que se manipulará a través de un panel de control Servosis. La prensa se puede observar en la Figura 4.3. También se puede apreciar el plato auxiliar inferior sobre el que está apoyado la probeta, también se colocará uno sobre la parte superior sobre el cual aplicará la carga la prensa. El uso de estos platos auxiliares será necesario para asegurar que la carga sea transmitida de manera uniforme. Del mismo modo, será también importante colocar la probeta de manera que las caras más planas y regulares sean las de aplicación de la carga, con el mismo objetivo anterior.



Figura 4.3 Prensa hidráulica utilizada para el ensayo de compresión simple.

La prensa aplicará la carga a una velocidad constante normalizada, por lo que se recogerán los datos de la carga aplicada y, por tanto, la carga máxima que podrá soportar la probeta será conocida, pudiéndose calcular a partir de ella la resistencia a compresión de la probeta.

Aprovechando la realización de este ensayo, se colocarán bandas extensométricas en las probetas con el fin de registrar las deformaciones longitudinales sufridas a causa de la carga, y con ello obtener el valor del Módulo de Young.

Las bandas extensométricas que se colocarán no son más que resistencias eléctricas que experimentan una variación en su valor cuando su propio filamento sufre un cambio de longitud a causa de la deformación que se produce en el material al que se encuentran adheridas[26]. Las bandas extensométricas se elegirán y colocarán según la norma EN 12390-4 [27] y dependerán del tamaño máximo del árido, por lo que en nuestro caso se utilizarán bandas de HBM de 20 mm. El material de las bandas en este caso es constatan, una aleación de cobre y níquel, que se caracteriza por presentar una relación lineal entre la variación de la resistencia y la deformación en un amplio rango de temperaturas[26]. Las bandas que se dispondrán tendrán una resistencia eléctrica  $120 \Omega \pm 0.30 \%$ . El factor de galga (factor k) será de  $2,08 \pm 1,0\%$ , la sensibilidad transversal será de  $-0,2\%$  y la tensión máxima de alimentación será de 7 V. Previo secado y lijado de las probetas (Figura 4.4) se colocarán las bandas en el centro de una de las caras de la probeta de manera minuciosa, donde no existan muchas coqueras, con el fin de asegurar una buena adherencia de éstas al hormigón utilizando un pegamento específico recomendado por el fabricante. Con estaño se soldarán los bornes de las bandas con el cable, que como incorporará la banda extensométrica a un circuito con configuración en puente de Wheatstone permitiendo la toma de datos (Figura 4.5)

Los datos recogidos serán las microdeformaciones sufridas por el material a causa de la aplicación de la carga. Con los datos de las microdeformaciones y la carga aplicada, se podrá obtener la ley tensión deformación  $\sigma - \varepsilon$ , de la que se podrá determinar el módulo de deformación longitudinal o módulo de Young. El proceso para su obtención se especificará con más detalle en el próximo capítulo.





Figura 4.4 Probetas secas y lijadas para la colocación de bandas extensométricas.

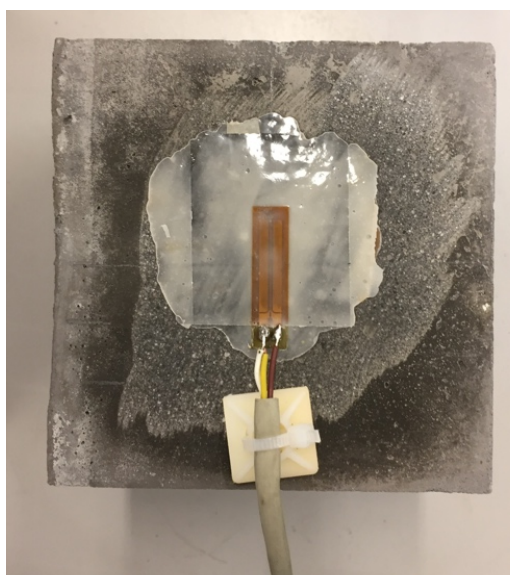


Figura 4.5 Probeta con banda extensométrica colocada lista para ensayar.

En las siguientes figuras se muestra la diferencia de rotura entre un hormigón con fibra y uno sin fibra. Mientras que las probetas D0 (Figura 4.6) se rompen por completo, desmoronándose al retirar la prensa tras el ensayo, en las probetas DSLPP (Figura 4.7), aunque evidentemente existirán grietas, la separación de los elementos es mucho menor, gracias a la acción de ligadura de las fibras, que cosen las grietas impidiendo este desprendimiento.



Figura 4.6 Probeta D0 ensayada a compresión simple.

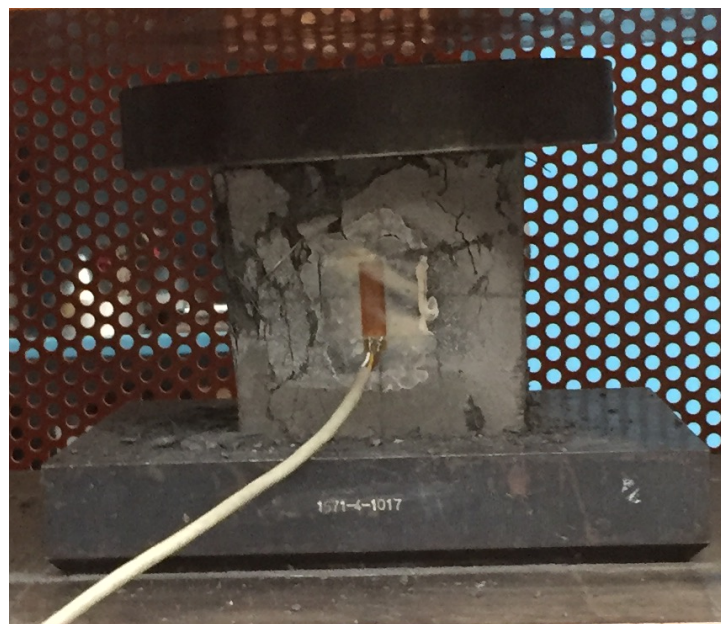


Figura 4.7 Probeta DSLPP ensayada a compresión simple.



### 4.3 Ensayo de flexión en tres puntos

Con este ensayo se busca poder calcular la energía de fractura  $G_F$ , según el método RILEM, que se define como la cantidad de energía que se requiere para provocar una unidad de área de grieta [28] y la resistencia a flexión  $f_{cf}$ . El ensayo se realiza según la norma EN-12390-5:2009 [29], sobre una probeta prismática entallada, de manera que se pueda predecir donde se producirá la grieta, y así controlar su apertura. Las probetas tendrán unas dimensiones de  $100 \times 100 \times 440 \text{ mm}^3$ , y la entalla, que será realizada en nuestro caso mediante corte por sierra de disco una vez haya endurecido y curado el hormigón, tendrá una profundidad de  $1/6$  del canto de la probeta, es decir, será de  $16,6$  milímetros.

La probeta estará apoyada sobre dos rodillos entre los que existe una distancia de 400 milímetros. El tercer rodillo, que se situará en el centro de la parte superior de la probeta, será el que aplique la carga, como muestra la Figura 4.8. Los apoyos son rodillos deslizantes por lo que evitan así las disipaciones de energía producidas por torsiones secundarias [28]. La máquina encargada de realizar el ensayo deberá ser una prensa servo hidráulica que permita el control en desplazamiento o en apertura de boca de grieta, conocida por su término anglosajón CMOD (Crack Mouth Open Displacement) con un transductor de pinza, de manera que se pueda asegurar un crecimiento estable de grieta. Además, será necesaria la colocación de un transductor lineal LVDT (Linear Variable Displacement Transducer) con el fin de medir el desplazamiento vertical ( $\delta$ ) del punto de aplicación de la carga, para así poder representar la curva carga-flecha ( $P$ - $\delta$ ) necesaria para la obtención de la energía de fractura.

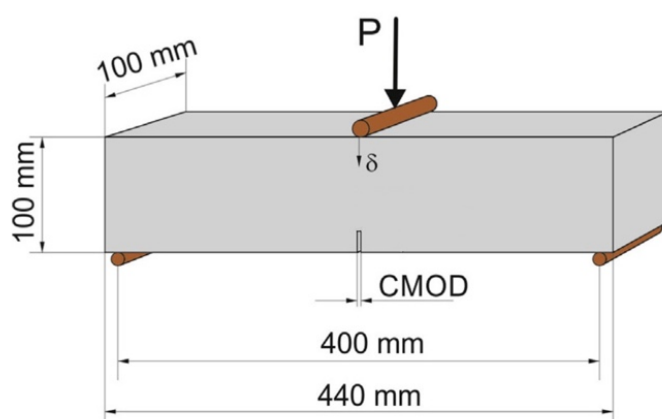


Figura 4.8. Esquema del ensayo de flexión en tres puntos.

Además, para la correcta realización del ensayo, todas las probetas deberán ser instrumentadas. Se les colocará una chapa metálica situada en la mitad de la entalla (solo pegada en uno de los labios para no dificultar la apertura de la entalla) donde irá apoyado el transductor LVDT midiendo el desplazamiento vertical, sujeto por un marco de referencia que sujeta la probeta. Para poder colocar el transductor de pinza se pegará una chapa a cada lado de la entalla, donde podrá quedar sujeto el transductor. Ambas chapas se pueden observar en la Figura 4.9.

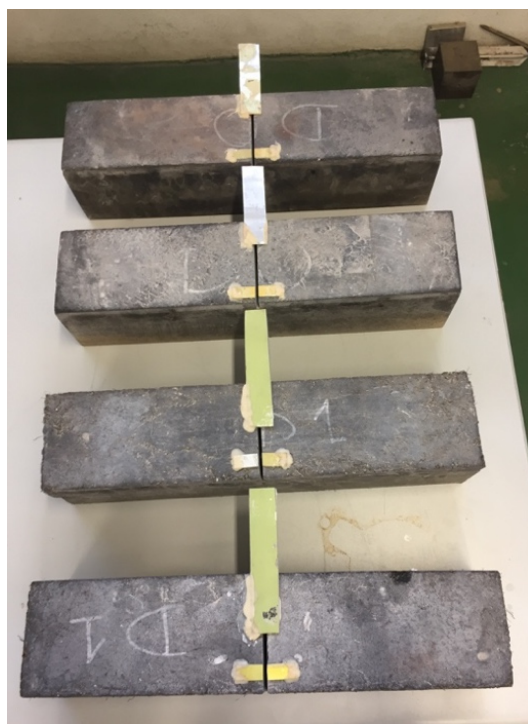


Figura 4.9 Probetas instrumentadas.

Se utilizarán dos equipos de ensayo distintos, una para las probetas D0, y otra para las DSLPP, ya que el ensayo diferirá según se realice en un tipo de hormigón u en otro.

En el caso del hormigón sin fibra se utilizará una prensa de hidráulica en la que el eje superior, donde se encuentra el rodillo que aplica la carga, es fijo mientras que el eje inferior donde se apoya la probeta es el móvil como muestra la Figura 4.11. La utilización de esta máquina es la necesidad de realizar un control en apertura de boca de grieta ya que el hormigón de ultra alta resistencia sin fibra es un material de gran fragilidad, por lo que el ensayo se deberá hacer con la mayor lentitud posible para evitar una rotura frágil del material. Esta máquina nos permite aumentar la carga controlando la apertura de la boca de grieta con un incremento de hasta 0,0005 mm por minuto. En la Figura 4.10 se pueden apreciar con mayor detalle los transductores LVDT y de pinza. El ensayo se realizará en a distintas velocidades, dependiendo de lo problemático que sea el tramo del ensayo en el que nos encontremos, por ejemplo, alrededor de la carga pico será la zona donde la velocidad sea menor, de manera que podamos obtener esa zona de la curva lo más exacta posible.



Figura 4.11. Máquina hidráulica con control en apertura de la boca de grieta.

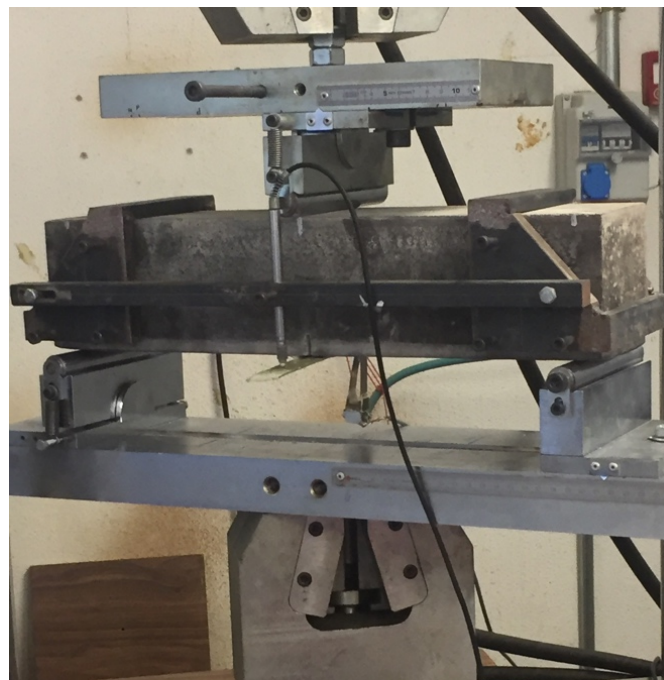


Figura 4.10. Transductores de pinza y LVTD.

En la Figura 4.12 se puede apreciar la magnitud de la grieta que se produce en los hormigones D0, lo que da explicación a la necesidad de realizar el ensayo con control en apertura de boca de grieta esas velocidades tan pequeñas. Las Figuras 4.13 y 4.14 muestran todas las probetas a las que ya se les ha realizado en ensayo. Como se puede observar las probetas rompen en dos mitades, y esto ocurre de manera súbita una vez haya terminado el ensayo, incluso a veces si no parada la maquina no habían roto, el mero hecho de descargar la probeta hacía que se rompieran.



Figura 4.12 Grieta producida en una probeta D0 en un ensayo de flexión en tres puntos.

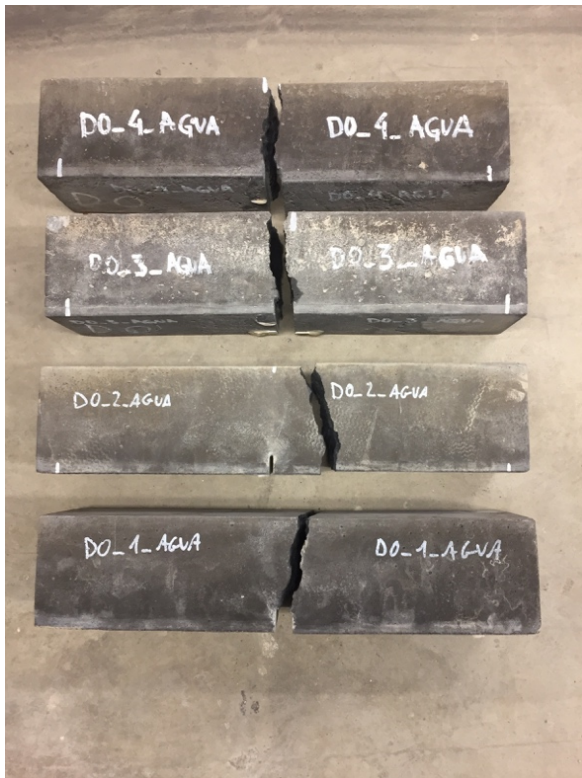


Figura 4.13 Probetas D0 sometidas a choque térmico en agua tras el ensayo de flexión en tres puntos.



Figura 4.14 Probetas D0 sometidas a choque térmico en aire tras el ensayo de flexión en tres puntos.

En el caso del hormigón con fibra, DSLPP, podemos adelantar, que la probeta no llegará a romperse, ya que las fibras proporcionan una ligadura que evita que la probeta rompa en dos mitades como ocurría con las probetas D0, por lo que en este caso no necesitaremos la lentitud que precisaríamos para el ensayo en probetas D0, pudiendo utilizar una prensa que permita un control en desplazamiento vertical, siendo este ensayo mucho más rápido que el anterior. La prensa utilizada será ME 406/15 Servosis en la que el eje móvil será el superior, a diferencia de como ocurría en la utilizada para las probetas D0. En la Figura 4.15 se muestra la prensa utilizada, y en la Figura 4.16 se pueden apreciar tanto el transductor de pinza como el LVDT, así como el marco de referencia al que se han hecho alusiones, encargado de proporcionar sujeción a este último transductor.





Figura 4.15. Máquina hidráulica con control en desplazamiento.



Figura 4.16. Transductores de pinza y LVDT en una probeta DSLPP.

En la Figura 4.17 se puede apreciar a la perfección el efecto de ligadura y de cosido de grieta que proporcionan las fibras metálicas, impidiendo que las probetas lleguen a romper. Así como en la Figura 4.18, que muestra cuatro de las probetas DSLPP tras haberles realizado el ensayo, se toma conciencia de la dimensión de la grieta que se produce en las probetas DSLPP, que nada tiene que ver con la dimensión de las grietas de las probetas D0. Es por ello por lo que las curvas  $P-\delta$  obtenidas para los dos hormigones no serán comparables, ya que se encuentran en escalas totalmente distintas.



Figura 4.17 Grieta producida en una probeta DSLPP en un ensayo de flexión en tres puntos.



Figura 4.18 Probetas DSLPP tras el ensayo de flexión en tres puntos.



## 5 RESULTADOS

En este capítulo se presentarán los resultados obtenidos en los ensayos realizados en el laboratorio. Se expondrá de manera breve el procedimiento para el cálculo de las propiedades mecánicas derivadas de los datos obtenidos en dichos ensayos. Además, se llevará a cabo un análisis comparativo de estos resultados con los recogidos en los estudios ya realizados sobre el mismo tipo de hormigón ensayado a temperatura ambiente y enfriado dentro del horno tras su calentamiento a 300°C, tanto en hormigones reforzados con fibra, como en los no reforzados.

### 5.1 Ensayo de compresión simple

Gracias a este ensayo se podrán obtener los valores de la resistencia a compresión  $f_c$  y el Módulo de Young  $E$ .

#### 5.1.1 Resistencia a compresión

La resistencia a compresión  $f_c$ , expresada en MPa (N/mm<sup>2</sup>), se define según la norma EN 12390-3:2009 como:

$$f_c = \frac{F}{A_c}$$

Dónde:

$f_c$  es la resistencia a compresión [MPa]

$F$  es la carga máxima de rotura [N]

$A_c$  es el área transversal de la probeta sobre la que actúa la fuerza de compresión [mm<sup>2</sup>]

De esta manera, los resultados obtenidos se muestran en las siguientes tablas 5.1 Y 5.2.



Tabla 5.1 Resultados de la resistencia a compresión en probetas cúbicas D0

D0	RESISTENCIA A COMPRESIÓN $f_c$ [MPa]	RESISTENCIA A COMPRESIÓN MEDIA $f_c$ [MPa]	DESVIACIÓN [MPa]	DESVIACIÓN [%]
D0_AIR_com_1	105,12	98,82	9,32	9%
D0_AIR_com_2	88,12			
D0_AIR_com_3	103,23			
D0_AG_com_1	104,18	106,55	7,17	7%
D0_AG_com_2	114,60			
D0_AG_com_3	100,86			

Tabla 5.2 Resultados de la resistencia a compresión en probetas cubicas DSLPP

DSLPP	RESISTENCIA A COMPRESIÓN $f_c$ [MPa]	RESISTENCIA A COMPRESIÓN MEDIA $f_c$ [MPa]	DESVIACIÓN [MPa]	DESVIACIÓN [%]
DSLPP_AIR_com_1_Bordes no definidos*	113,40*	132,10	1,75	1%
DSLPP_AIR_com_2_Bordes no definidos	130,86			
DSLPP_AIR_com_3	133,33			
DSLPP_AG_com_1	121,56	119,34	1,93	2%
DSLPP_AG_com_2	118,07			
DSLPP_AG_com_3	118,38			

\*No incluido en la media de los resultados.

#### 5.1.1.1 Hormigón sin fibra D0

La Figura 5.1 presenta los datos experimentales obtenidos para la resistencia a compresión de un hormigón de ultra-alta resistencia en las situaciones de: temperatura ambiente, calentado hasta 300°C y enfriado dentro del horno, calentado a 300°C y enfriado al aire y, calentado a 300°C y enfriado en agua.

Al someter al hormigón a un aumento de temperatura, se produce una pérdida de masa a causa de la evaporación del agua que contienen los poros [3]. Esta evaporación se da especialmente en los poros capilares, los microporos, lo que se traduce en un aumento de la porosidad del

hormigón, provocando principalmente un incremento en el número de poros del orden de los milímetros [3].

No obstante, como se puede apreciar en la Figura 5.1. una vez calentado y posteriormente dejado enfriar en el horno, el hormigón presenta un aumento de la resistencia a compresión. Esto ocurre gracias a que el vapor de agua generado por el aumento de temperatura, pueda ser evacuado del hormigón a través del mayor número de poros generados como consecuencia también del incremento de temperatura, evitando presiones internas indeseadas en los poros, además de promover la hidratación del cemento a su paso [12]. Este fenómeno se traduce en un aumento de la resistencia a compresión de un 4% con respecto a la resistencia a compresión ensayada a temperatura ambiente, como se puede observar en la Figura 5.1.

Sin embargo, esto se producirá en una situación en la que el proceso sea relativamente lento, y permita que esa evacuación e hidratación que proporciona el vapor de agua se complete adecuadamente, como es el caso de dejar al hormigón enfriar en el horno. Analizaremos ahora lo ocurrido cuando un proceso más rápido, como es el choque térmico, tiene lugar impidiendo que la situación anterior se desarrolle.

Como se puede observar en la Figura 5.1, tras las dos formas de choque térmico que se han recreado (enfriamiento en aire y enfriamiento en agua), la resistencia a compresión ha sufrido una disminución con respecto a la resistencia obtenida a temperatura ambiente, existiendo una notable diferencia entre estos dos últimos casos. En el caso de impacto térmico en aire se produce una reducción en la resistencia de un 10% mientras que en el impacto térmico en agua la reducción es del 3%. Se concluye que, en ambos casos, el hecho de someterlos a un cambio brusco de temperatura impide que el vapor de agua que aún no ha salido de los poros quede retenido en ellos de manera que genere una serie de presiones internas que resulten desfavorables en el hormigón. Se podría pensar que en el caso de enfriar la probeta al aire permite que el vapor de agua escape con más facilidad, aunque no daría lugar a que se hidratase la matriz a causa de la velocidad del proceso, mientras que en el caso de enfriamiento en agua, aunque la evacuación del vapor de agua de los poros sea más costosa, el hecho de que la probeta esté sumergida en agua supondrá la rehidratación del cemento, mejorando en cierto modo las propiedades perdidas a causa del aumento de temperatura.

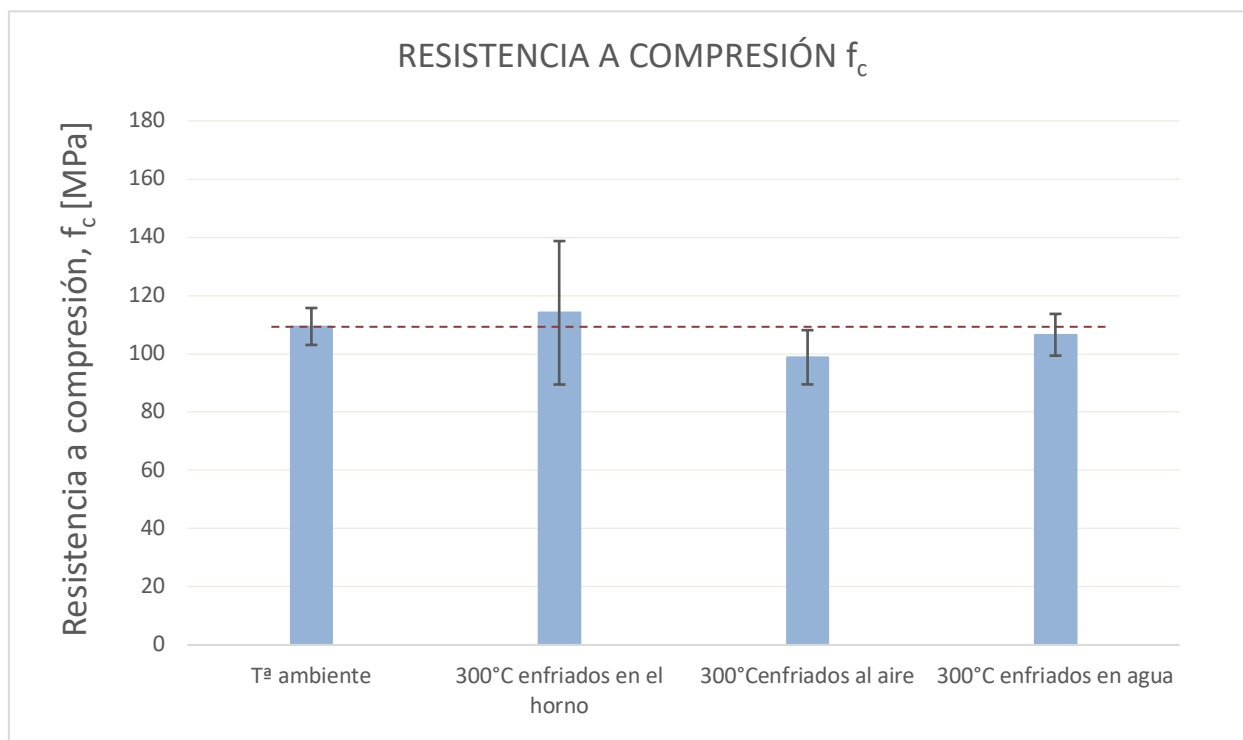


Figura 5.1 Resistencia a compresión D0.

#### 5.1.1.2 Hormigón con fibras DSLPP

Gracias al trabajo de Rios et al. [5] se conoce que un incremento de la temperatura provoca un aumento de la porosidad en hormigones de ultra alta resistencia, especialmente de los microporos, de una manera mucho más drástica que como ocurría en el hormigón sin fibra D0. Aunque a temperatura ambiente la porosimetría de un hormigón con fibras resulta mucho más homogénea que en un hormigón sin fibras, el efecto que la temperatura tiene a parte de aumentar la porosidad, es provocar una deshomogenización de la distribución de poros incrementando de manera notable la cantidad de microporos [3]. De la misma manera, los poros en los hormigones con fibras presentan una esfericidad más baja que la de los hormigones D0, ya que éstos suelen aparecer bajo las fibras, por lo que a la hora de sufrir los efectos de las presiones internas generadas por el vapor de agua acumulado en los poros supone un inconveniente [5]. Por el contrario, contrarrestando el efecto negativo de las fibras metálicas frente al calor aparecen las fibras de polipropileno. Las fibras de polipropileno son sensibles al calor y funden a una temperatura máxima de 176 °C aproximadamente, y se evaporan en su totalidad a 460 °C. En este caso, como la temperatura máxima que alcanzan las probetas es de 300 °C, las fibras de polipropileno no llegarán a evaporarse, pero si se fundirán parcialmente y crearán unos canales a través de la matriz por los que el vapor de agua generado en los poros a causa de la temperatura pueda ser evacuado con mayor facilidad [12]. Ésto se muestra reflejado en la Figura 5.2, en la que a simple vista la resistencia a compresión de DSLPP calentada a 300 °C

y enfriado al horno apenas varía con respecto a la obtenida a temperatura ambiente, ya que solo se mejora un 0,17 %. De la misma manera que como ocurría en el caso de D0, al ser un proceso de enfriado lento, ya que es en el horno, también se producirá una hidratación del cemento, tanto por parte del vapor de agua como por las fibras de polipropileno. Por lo que todas estas causas serán las que permitirán compensar los efectos negativos de la temperatura, además de conseguir mejorar esta propiedad, aunque sea solo un poco.

En el caso del choque térmico la situación cambia con respecto a lo que se observaba en D0. Como muestra la Figura 5.2, en este caso el choque térmico generado sumergiendo las probetas en agua resulta más desfavorable que dejándolas enfriar al aire. En el primer caso (enfriamiento en agua), la disminución de la resistencia a compresión ha sido de un 18% con respecto al valor a temperatura ambiente, mientras que en el segundo caso (enfriamiento en aire) de un 9%. Del mismo modo que ocurría en D0 resultará más complicado la evacuación del vapor de agua en el caso de enfriamiento en agua que, en aire, aunque en este caso, además de abandonar la matriz a través de los poros tendrá que hacerlo a través de los canales que proporcionan las fibras de polipropileno fundidas, por lo que será más costoso aún. En este caso, la presión interna tiene una mayor influencia que la hidratación, ya que el número de poros es menor, a consecuencia de la fusión de las fibras de polipropileno que, al ser absorbidas por los poros de los alrededores, reducen en cierto modo el aumento de la porosidad que se produce a causa del aumento de temperatura.

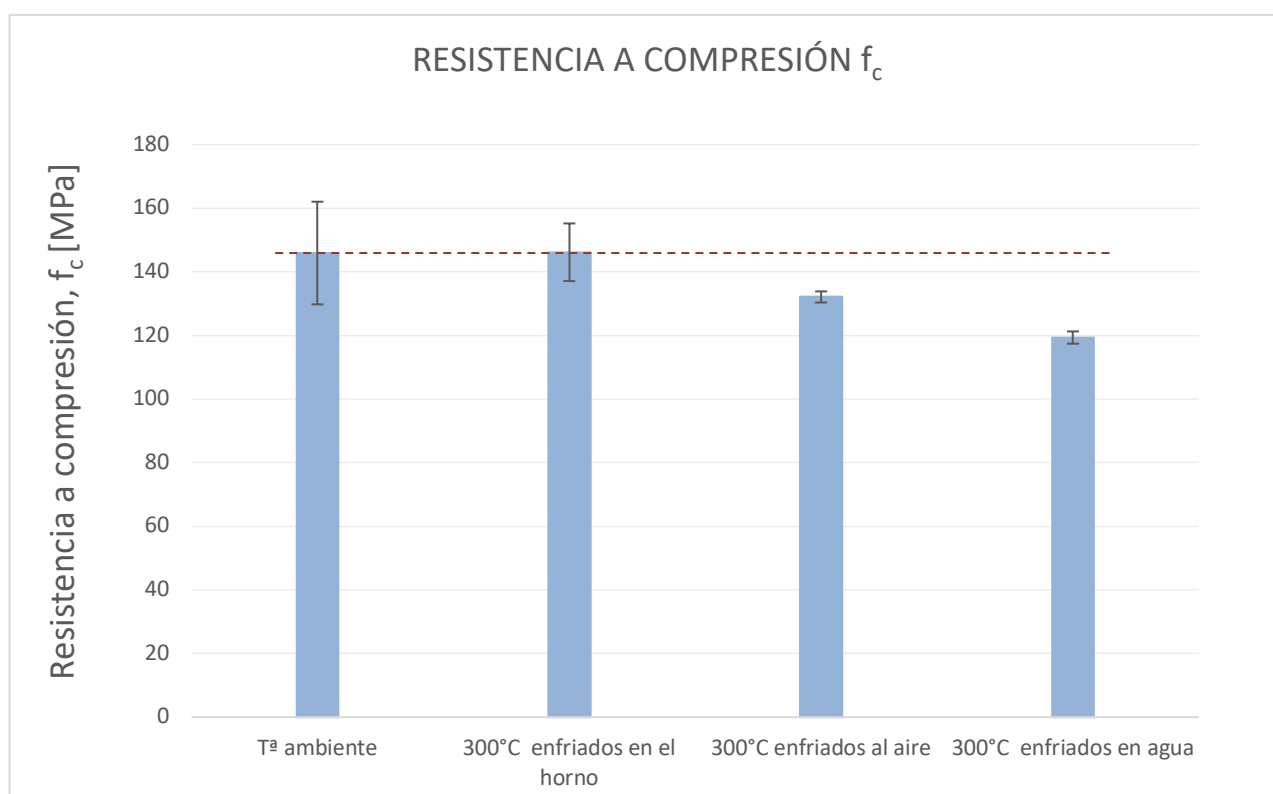


Figura 5.2 Resistencia a compresión de DSLPP.

### 5.1.2 Módulo de Young

Para obtener el módulo de deformación longitudinal, más conocido como módulo de Young, es necesario obtener la ley tensión-deformación ( $\sigma - \varepsilon$ ) de nuestro material. Se obtendrá el Módulo de Young como la pendiente de la ley tensión-deformación en la zona lineal. Será necesaria la modificación de estas curvas, principalmente en el tramo inicial ya que se produce un aplastamiento del hormigón debido a la aplicación de la carga, que genera una pendiente no constante, que no es representativa del comportamiento del hormigón[28].

En la Figura 5.3 (a) se pueden observar una de las curvas obtenidas en el ensayo, y en la Figura 5.3 (b) su correspondiente curva corregida, de la que se tomará el dato del módulo de Young. De esta manera, hemos obtenido los siguientes valores del módulo de Young tanto para D0 como para DSLPP como se muestran en las Tablas 5.3 y 5.4.

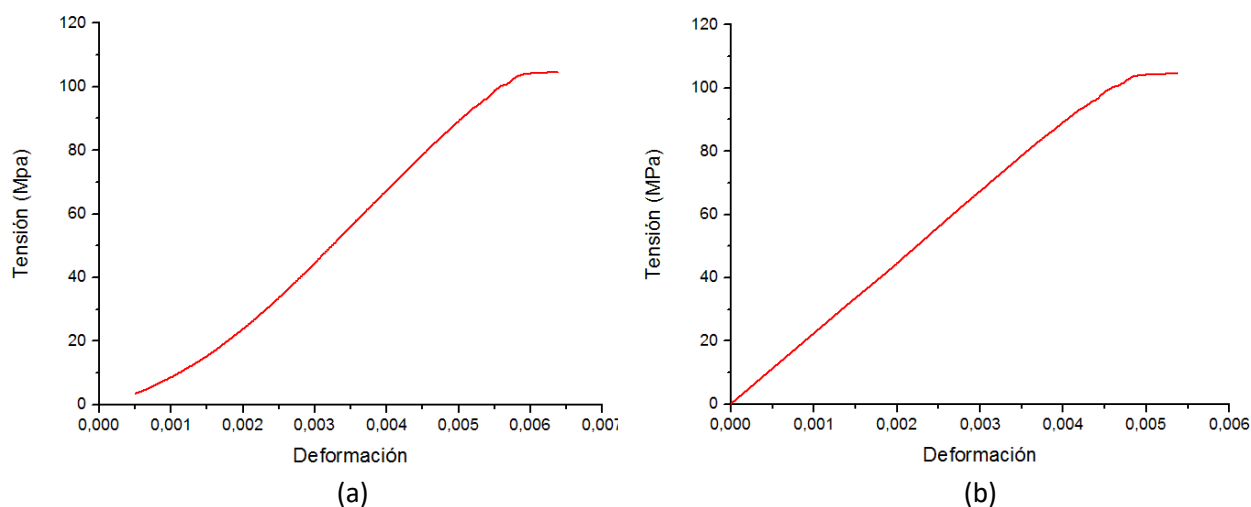


Figura 5.3 Gráficas  $\sigma - \varepsilon$  del ensayo de compresión  
(a) sin modificar y (b) modificada.

Tabla 5.3 Resultados del Módulo de Young en probetas cúbicas D0.

D0	MÓDULO DE YOUNG E [GPa]	MÓDULO DE YOUNG E MEDIO $f_c$ [GPa]	DESVIACIÓN [GPa]	DESVIACIÓN [%]
D0_AIR_com_1	22,02	22,91	0,79	3%
D0_AIR_com_2	23,54			
D0_AIR_com_3	23,17			
D0_AG_com_1	23,08	25,83	2,54	10%
D0_AG_com_2	28,10			
D0_AG_com_3	26,30			

Tabla 5.4 Resultados del Módulo de Young en probetas cúbicas DSLPP.

DSLPP	MÓDULO DE YOUNG E [GPa]	MÓDULO DE YOUNG MEDIO E [GPa]	DESVIACIÓN [GPa]	DESVIACIÓN [%]
DSLPP_AIR_com_1_Bordes no definidos*	37,01*	17,15	1,69	10%
DSLPP_AIR_com_2_Bordes no definidos	15,95			
DSLPP_AIR_com_3	18,35			
DSLPP_AG_com_1	20,33	24,79	5,04	20%
DSLPP_AG_com_2	30,26			
DSLPP_AG_com_3	23,79			

\*No incluido en la media de los resultados.

Con el fin de analizar de una forma más general el efecto de la temperatura y la velocidad de enfriamiento sobre el módulo de deformación longitudinal, se introducirá una variable de daño que se definirá de la siguiente manera:

Sea la ley de comportamiento:

$$\sigma = E \varepsilon$$

Se define el daño sobre el módulo de Young como:

$$\sigma = (1 - \omega)E \varepsilon$$

Por lo que la variación respecto al modulo de Young de referencia:

$$E_0(1 - \omega_i) = E_i$$

Dónde:

$E_0$	Módulo de Young a temperatura ambiente
$E_i$	Módulo de Young enfriado calentado a 300°C y enfriado para i=horno, aire, agua
$\omega_i$	variable de daño del módulo de Young.

De modo que la variable de daño en cada situación y para cada tipo de hormigón (D0 y DSLPP), se calculará como:

$$\omega_i = 1 - \frac{E_i}{E_0}$$

Para el análisis del modulo de Young se realizará una comparación conjunta para D0 y DSLPP. El motivo de esto, es que ya otros autores [5] han evidenciado que el factor que influencia al módulo de Young es la existencia de una importante cantidad de poros del orden de nanómetros, y la reducción de poros que presenta DSLPP en comparación con D0 se sitúa en el rango de los microporos, como se ha indicado previamente. De hecho, se puede observar que los valores del módulo de Young tanto para D0 como para DSLPP son muy parecidos a temperatura ambiente.

No obstante, el daño térmico generado por la presión que ejerce el vapor de agua afecta principalmente a los poros de la escala nanométrica, y por tanto esto se refleja en una disminución significativa del módulo de Young. Como se puede observar en las Tablas 5.5 y 5.6, la variable de daño  $\omega_{HORNO}$  toma valores de 0,38 y 0,31 para D0 y DSLPP respectivamente.

En los casos de choque térmico, era de esperar que el daño fuera mayor ya que el vapor queda retenido en estos nanoporos de una manera más significativa, reduciendo el modulo de Young en ocasiones incluso hasta más de la mitad del valor de referencia. Se puede concluir con los datos obtenidos que el daño térmico que ocasiona un impacto térmico en aire es notablemente

mayor que el producido en agua.  $\omega_{AIRE}$  toma valores de 0,5 y 0,64 en D0 y DSLPP respectivamente, mientras que  $\omega_{AGUA}$  oscila entre 0,43 y 0,47. Con esto se puede concluir que en el caso de provocar el choque térmico en agua permite hidratar la matriz de hormigón, evitando la excesiva pérdida de rigidez que supone enfriar las probetas al aire. En las Figuras 5.4 y 5.5 se puede apreciar de manera cualitativa el daño que provoca la temperatura en el módulo de Young. Es necesario mencionar que en este ensayo lo que se está haciendo es comprimir las probetas y por tanto comprimir los poros, por lo que el daño térmico que pudiera haber ocasionado la temperatura en dichos poros no se pondrá del todo de manifiesto.

Tabla 5.5 Variable de daño de E para D0.

D0	
$\omega_{HORNO}$	0,38
$\omega_{AIRE}$	0,50
$\omega_{AGUA}$	0,43

Tabla 5.6 Variable de daño de E para DSLPP.

DSLPP	
$\omega_{HORNO}$	0,31
$\omega_{AIRE}$	0,64
$\omega_{AGUA}$	0,47



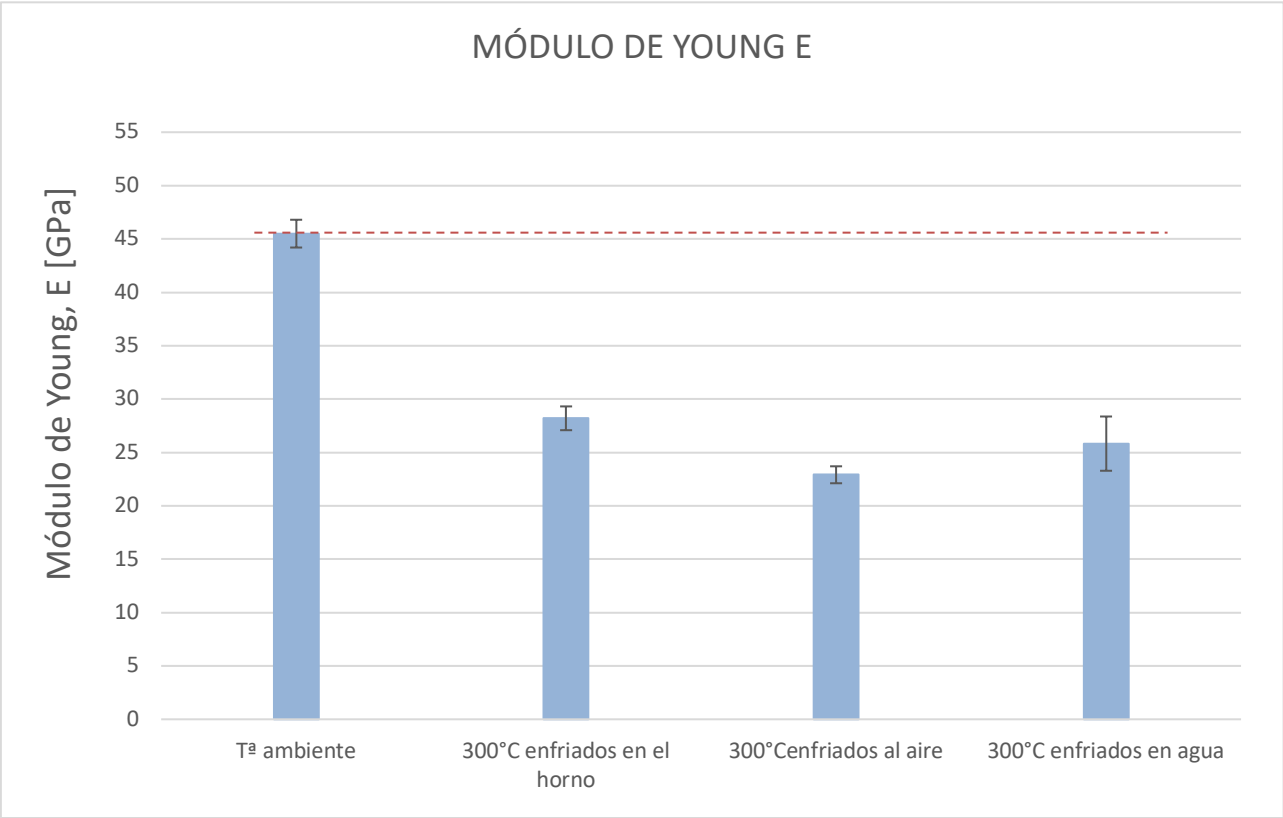


Figura 5.4 Módulo de Young D0.

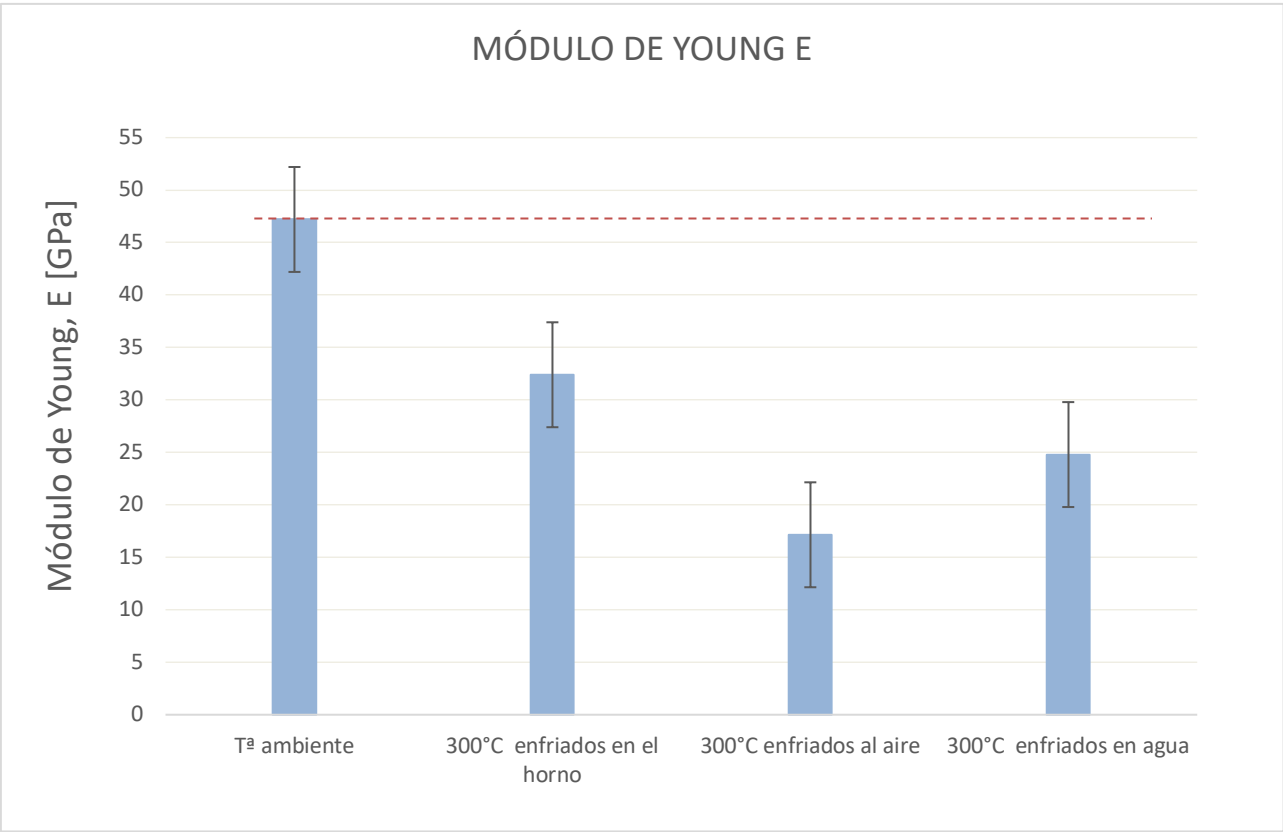


Figura 5.5 Módulo de Young DSLPP.

## 5.2 Ensayo de flexión en tres puntos

El objetivo de este ensayo es la determinación de la energía de fractura y de la resistencia a flexotracción para caracterizar nuestro material.

### 5.2.1 Energía de fractura

Para obtener la energía de fractura  $G_F$ , es necesario conocer el trabajo de fractura, el cual calcularemos gracias a la curva carga-flecha ( $P - \delta$ ), que podremos representar con los datos de desplazamiento vertical procesados por el LVDT y con los datos de la carga aplicada. No obstante, este trabajo de fractura debe incluir la compensación del peso propio que no queda reflejada en la curva  $P - \delta$ , por lo que se utilizará el ajuste del método de la cola según RILEM [30] para incluirlo, además de una serie de modificaciones en la curva que se muestran a continuación.

La energía de fractura específica real se calculará de la siguiente manera:

$$G_F = \frac{\int_0^{\delta_u} P d\delta + \frac{2A}{\delta_u}}{B(D - a_0)}$$

En la que el término integral respresenta la energía medida, y el término  $2A/\delta_u$  la energía de fractura no medida. El denominador representa el área de ligadura.

Dónde:

P	carga registrada en Newton
A	parámetro de la ecuación que caracteriza la cola de ajuste en Nmm <sup>2</sup>
$\delta_u$	último desplazamiento registrado en milímetros
B	ancho de la sección en milímetros
D	alto de la sección en milímetros
$a_0$	profundidad de la entalla en milímetros

Con el objetivo de calcular de la manera más exacta posible el trabajo de fractura medido como el área bajo la curva  $P - \delta$ , se realizan una serie de modificaciones a la curva de manera que ésta represente un comportamiento que refleje lo más fielmente posible la realidad.

Se ha realizado una reducción del número de puntos de la curva ya que, al tratarse de unos ensayos de relativa lentitud, se registran gran cantidad de puntos, que generan unas oscilaciones que “ensucian” la curva, por lo que es necesario limpiarla y suavizarla. Será necesario también, tanto eliminar el tramo horizontal registrado por la máquina en el que el ensayo aún no ha comenzado, y corregir la pendiente inicial de la curva, del mismo modo que se producía en las curvas obtenidas del ensayo de compresión, ya que se produce un aplastamiento del hormigón en los puntos de apoyo y aplicación de la carga, que generan una pendiente no constante, que no es representativa del comportamiento del hormigón [28]. Por último, es necesario escalar la curva, de manera que el comienzo de la curva coincida con el origen de coordenadas, y termine con fuerza cero. Esto último es necesario principalmente para la obtención de los datos para el cálculo del ajuste de la cola. Todas estas modificaciones se pueden apreciar en las siguiente Figura 5.6.

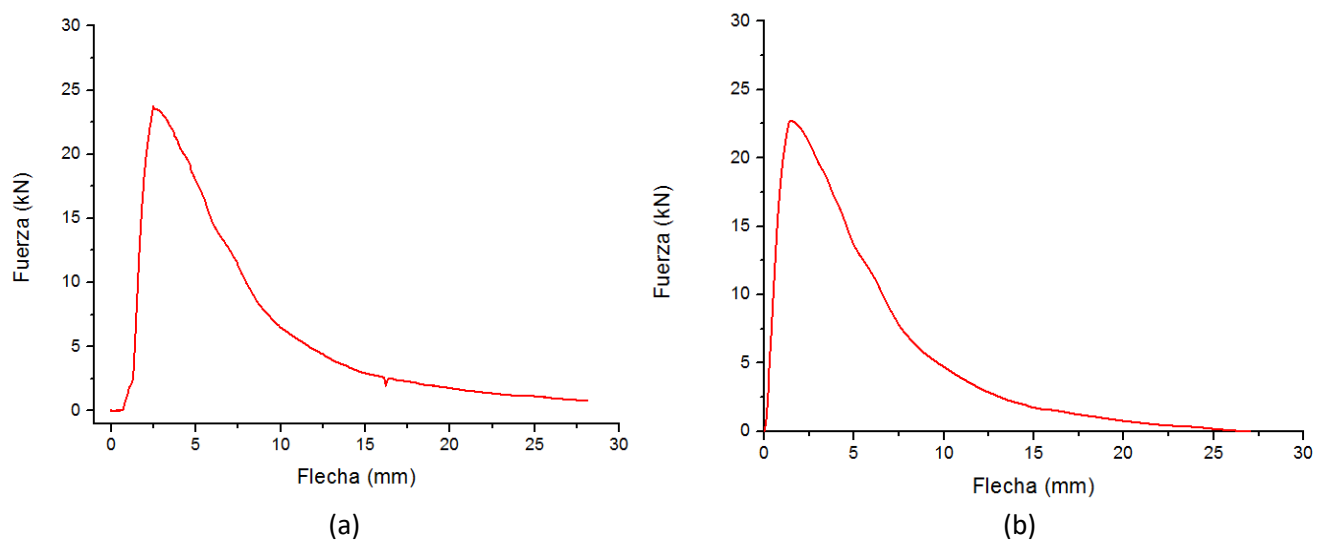


Figura 5.6 Gráficas  $P - \delta$  de ensayo de flexión en tres puntos (a) sin modificar, y (b) corregida.

### 5.2.2 Resistencia a flexotracción

La resistencia a flexión será calculada según lo indicado en el Anexo A de la norma EN 12390-5:2009 [29] con la siguiente expresión:

$$f_{cf} = \frac{3 F l}{2 B D^2}$$

$f_{cf}$  es la resistencia a flexión en MPa  
 $F$  es la carga máxima en N  
 $L$  es la distancia entre rodillos en mm  
 $B$  es el ancho de la probeta en mm  
 $D$  es el alto de la probeta en mm

### 5.2.3 Resultados del ensayo de flexión en tres puntos

Para este ensayo, se comparará a la vez tanto la energía de fractura como la resistencia a flexotracción debido a la conexión existente entre ellas. Por tanto, se muestran a continuación los resultados de los ensayos. En las Tablas 5.7 y 5.8 se mostrarán los resultados obtenidos para las probetas D0 de energía de fractura y de resistencia a flexotracción respectivamente, mientras que las Tablas 5.9 y 5.10 mostrarán los resultados obtenidos de las probetas DSLPP.

Tabla 5.7 Resultados de la energía de fractura en probetas prismáticas D0.

D0	ÁREA [kN mm]	$\delta_u$ [mm]	ENERGÍA DE FRACTURA $G_f$ [N/m]	ENERGÍA DE FRACTURA MEDIA $G_f$ [N/m]	DESVIACIÓN [N/m]	DESVIACIÓN [%]
D0_1_AIRE	1,33	0,76	164,78	136,13	24,41	18 %
D0_2_AIRE	0,89	0,65	108,37			
D0_3_AIRE	1,07	1,03	125,79			
D0_4_AIRE	1,22	1,20	145,59			
D0_1_AGUA	1,19	1,40	130,50	91,39	40,80	45 %
D0_2_AGUA	-	-	-			
D0_3_AGUA	0,55	0,41	67,21			
D0_4_AGUA	0,61	1,01	68,47			

Tabla 5.8 Resultados de la resistencia a flexotracción en probetas prismáticas D0.

D0	CARGA MÁXIMA [N]	RESISTENCIA A FLEXIÓN $f_{cf}$ [MPa]	RESISTENCIA A FLEXIÓN MEDIA $f_{cf}$ [MPa]	DESVIACIÓN [MPa]	DESVIACIÓN [%]
D0_1_AIRE	9046	5,43	4,48	0,68	15 %
D0_2_AIRE	6890	4,13			
D0_3_AIRE	7443	4,47			
D0_4_AIRE	6471	3,88			
D0_1_AGUA	5451	3,27	3,09	0,15	5 %
D0_2_AGUA	-	-			
D0_3_AGUA	5004	3,00			
D0_4_AGUA	5014	3,01			

Tabla 5.9 Resultados de la energía de fractura en probetas prismáticas DSLPP.

DSLPP	ÁREA [kN mm]	$\delta_u$ [mm]	ENERGÍA DE FRACTURA $G_f$ [N/m]	ENERGÍA DE FRACTURA MEDIA $G_f$ [N/m]	DESVIACIÓN [N/m]	DESVIACIÓN [%]
DSLPP_1_AIRE	84,14	20,79	11956,53	21907,93	6975,10	32 %
DSLPP_2_AIRE	192,56	23,82	27102,90			
DSLPP_3_AIRE	212,00	33,02	26362,97			
DSLPP_4_AIRE	166,75	23,16	22209,31			
DSLPP_1_AGUA	202,41	29,48	24547,88	25099,56	4583,47	18 %
DSLPP_2_AGUA	209,20	31,07	26161,59			
DSLPP_3_AGUA	226,11	28,39	30387,94			
DSLPP_4_AGUA	151,76	27,01	19300,82			

Tabla 5.10 Resultados de la resistencia a flexotracción en probetas prismáticas DSLPP.

DSLPP	CARGA MÁXIMA [N]	RESISTENCIA A FLEXIÓN $f_{cf}$ [MPa]	RESISTENCIA A FLEXIÓN MEDIA $f_{cf}$ [MPa]	DESVIACIÓN [MPa]	DESVIACIÓN [%]
DSLPP_1_AIRE	16440	9,86	14,72	3,26	22 %
DSLPP_2_AIRE	27850	16,71			
DSLPP_3_AIRE	27620	16,57			
DSLPP_4_AIRE	26200	15,72			
DSLPP_1_AGUA	31320	18,79	16,85	1,94	12 %
DSLPP_2_AGUA	27850	16,71			
DSLPP_3_AGUA	29470	17,68			
DSLPP_4_AGUA	23720	14,23			

### 5.2.3.1 Hormigón sin fibra D0

En el caso D0, se puede observar en la Figura 5.7 como la energía de fractura experimenta con la temperatura un aumento de casi tres veces el valor que se obtiene a temperatura ambiente. Como ocurría en el ensayo de compresión, el aumento de la temperatura genera un aumento de la porosidad, que permite evacuar el vapor de agua generado en un enfriamiento lento, de manera que se produzca una hidratación de la matriz dando lugar a un hormigón más dúctil, y por tanto, mejorando la energía de fractura residual. Esto no es del todo positivo, ya que la resistencia a flexotracción disminuye un 30%, poniendo de manifiesto, que solo se produce una mejora de la energía de fractura gracias a que el área encerrada bajo la curva  $P - \delta$  aumenta por una mejora en la parte final de ésta, a causa del aumento en la ductilidad.

En los casos de choque térmico que se han ensayado, la energía de fractura sufre una disminución considerable respecto al caso enfriado en el horno. La resistencia a flexotracción disminuye, aunque no dista mucho del valor obtenido enfriado al horno. Esto se debe a que el choque térmico no permite una adecuada hidratación del cemento, y por tanto la ductilidad no mejora todo lo que podría hacerlo, dando lugar a una mejora mucho menos significativa en la parte final de la curva  $P - \delta$ . Se podría decir, que esta menos efectiva hidratación es la causante de microfisuras a través de las cuales se propaga el daño, disminuyendo la resistencia a flexotracción. Se puede observar como en el caso del choque térmico en agua, el resultado es peor, tanto en energía de fractura como en resistencia a flexotracción. Esto refleja, que el daño térmico ocasionado al enfriar la probeta en agua es mayor. Además, como se puede observar en la Tabla 5.7 uno de los ensayos realizados en agua no pudo completarse, ya que la probeta rompió por un lugar distinto de donde

se encontraba la entalla, como consecuencia de daño térmico sobre algún defecto que ya tenía el material. El lugar de rotura se puede apreciar en la Figura 5.9. De igual modo, en los hormigones D0 los ensayos realizados tras el choque térmico en agua han resultado ser mucho más dispares, dando lugar a una mayor desviación. Este ensayo desvela indirectamente como de afectada queda la porosidad tras la temperatura y el impacto térmico.

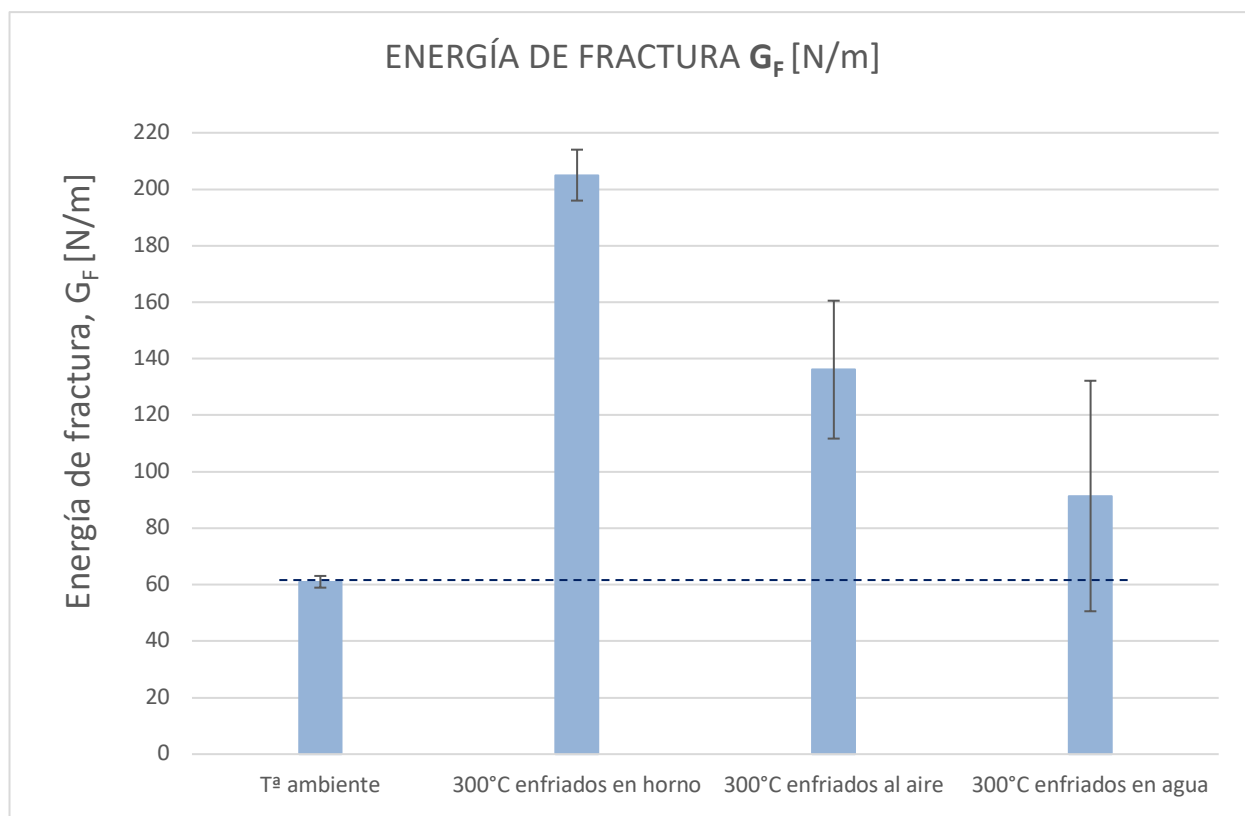


Figura 5.7 Energía de fractura D0.

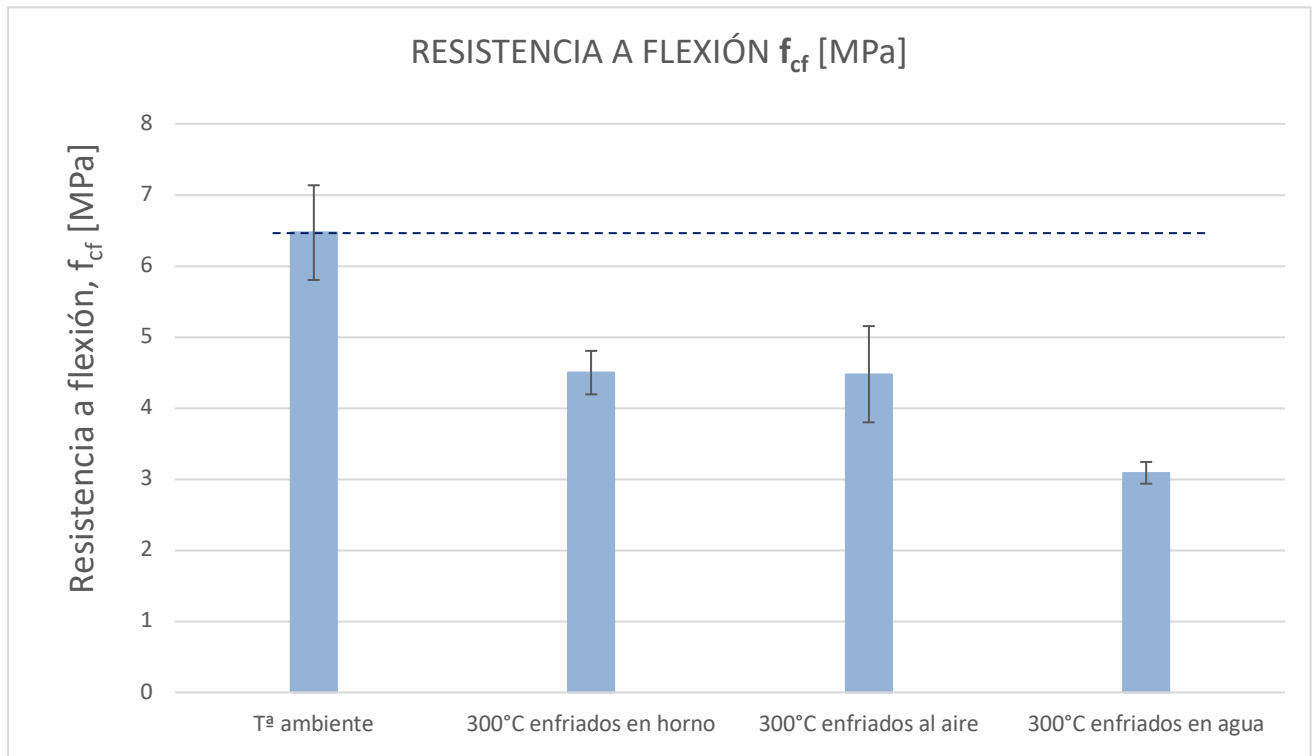
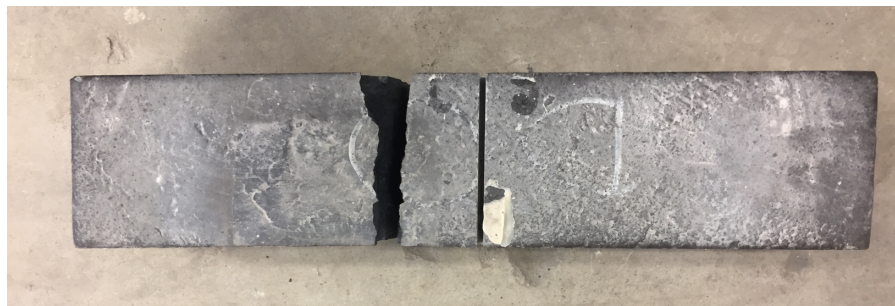


Figura 5.8 Resistencia a flexotracción D0



(a)



(b)

Figura 5.9 Probeta ensayada tras el efecto del choque térmico realizado en agua (a) planta, (b) perfil.



### 5.2.3.2 Hormigón con fibra DSLPP

La adición de fibras al hormigón, especialmente las metálicas, a temperatura ambiente resulta en un aumento de la energía de fractura de casi 70 veces la energía de fractura de los hormigones D0. Esto es gracias al fenómeno de unión y cosido de grietas que aportan las fibras al hormigón [28]. Se ha de comentar, que la mezcla de fibras largas y cortas utilizada es la mejor de las ensayadas en los estudios realizados por Ríos et al. [5] de cara a la mejora de los resultados en este ensayo, ya que combinan los efectos positivos de ambos tipos de fibra. La fibra corta mejora el comportamiento de la matriz ya que reduce en mayor medida la porosidad, mientras que la fibra larga mejora la adherencia dotando a la matriz de una mejor deformabilidad.

En el caso del hormigón con fibras, como se puede ver en la Figura 5.12 un aumento de la temperatura generará una disminución de la energía de fractura a causa de la presión interna generada por el vapor de agua en los poros. El aumento de la porosidad provocado por la temperatura se contrarresta como ya sabemos, en cierto modo por las fibras de polipropileno que, aunque a 300 °C se han fundido, y por tanto se ha perdido su efecto de ligadura, son absorbidas por los poros de los alrededores evitando un incremento excesivo de dicha porosidad.

El efecto de la temperatura sobre un hormigón reforzado con fibras de acero genera una disminución en la carga máxima soportada como se puede ver en la Figura 5.10 obtenida del trabajo realizado por Ríos et al. [3] sin que se pueda apreciar una mejora significativa de el comportamiento post-pico de la curva. No obstante, este efecto está contrarrestado por las fibras de polipropileno. Aunque éstas sometidas a temperatura también provocan una caída en la carga máxima soportada, si que mejoran el comportamiento plástico de la matriz de hormigón, como se puede observar en la Figura 5.11 [12], en la que se muestra el comportamiento de un hormigón de ultra alta resistencia reforzado con fibra de polipropileno sometido a distintas temperaturas, y en la que se puede apreciar como la curva tiene una forma cada vez mas acostada a causa de la temperatura.

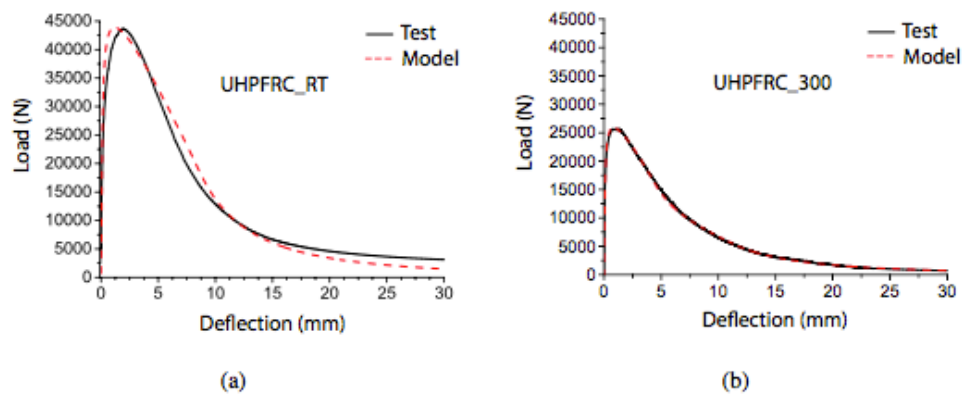


Figura 5.10 Curvas  $P - \delta$  de un hormigón reforzado con fibras metálicas a (a) temperatura ambiente y (b) 300 °C. Fuente: Ríos et al, 2018.

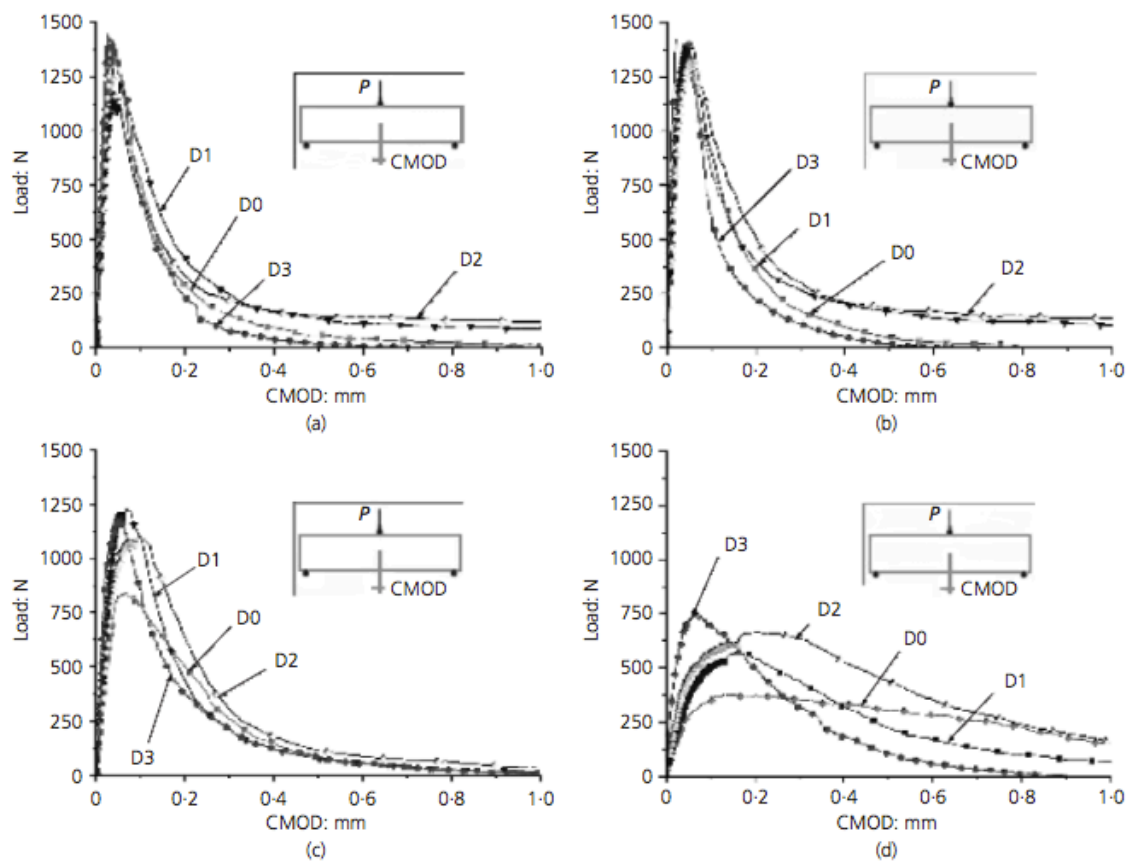


Figura 5.11 Curvas  $P - \delta$  de hormigones de ultra-alta resistencia reforzados con fibras de polipropileno de distintas longitudes a (a) temperatura ambiente, (b) 100 °C, (c) 300 °C, (d) 500 °C. Fuente: Cifuentes et al, 2011.

No obstante, esta mejora en la porosidad que proporcionan las fibras de polipropileno será un inconveniente en el caso del choque térmico, ya que será un menor número de poros los que tendrán que soportar las presiones internas que ejercerá el vapor de agua, que a causa del impacto térmico ha quedado atrapado en la matriz, y que supondrá un daño para los poros, disminuyendo la resistencia a flexotracción. Del mismo modo, al impedir que se produzca la hidratación, tras el choque térmico, se genera un hormigón que apenas mejora en ductilidad, por lo que la disminución de la energía de fractura se ve principalmente afectada por una reducción en la resistencia a flexotracción como se puede apreciar en la Figura 5.13, y no por una mejora en la etapa post-pico de la curva, la que hace referencia a la ductilidad, como ocurría en el caso de hormigón sin fibra.

En ambos casos, tras el choque térmico, la energía de fractura disminuye con respecto a la obtenida si se deja enfriar en horno como era de esperar, no obstante, en el caso del choque térmico en agua la situación es mejor que en el choque térmico en el aire por dos motivos: la disminución de resistencia a flexotracción es menor, y el valor final de la flecha  $\delta_u$ , que es mayor. Esto quiere decir que el choque térmico en agua es menos desfavorable. En necesario recalcar, que en este ensayo interviene de manera notable la porosimetría, ya que, a diferencia del ensayo a compresión, este ensayo puede poner de manifiesto el daño térmico ocasionado en los poros, ya que en este caso no se comprimen, sino que se abren, así como la propagación de dicho daño. En el caso de enfriamiento al aire, el vapor de agua encontrará menos dificultades para evacuar la matriz fomentando su deshidratación, y por tanto permitiendo el aumento de la porosidad, haciendo al material más frágil y creando una red de microfisuras mayor. Por otro lado, en el caso de estar sumergido en agua, se impedirá de manera más notable que el vapor retenido en los poros escape, y aunque pueda generar mayores presiones permitirá una mayor hidratación del cemento, haciéndolo más dúctil.

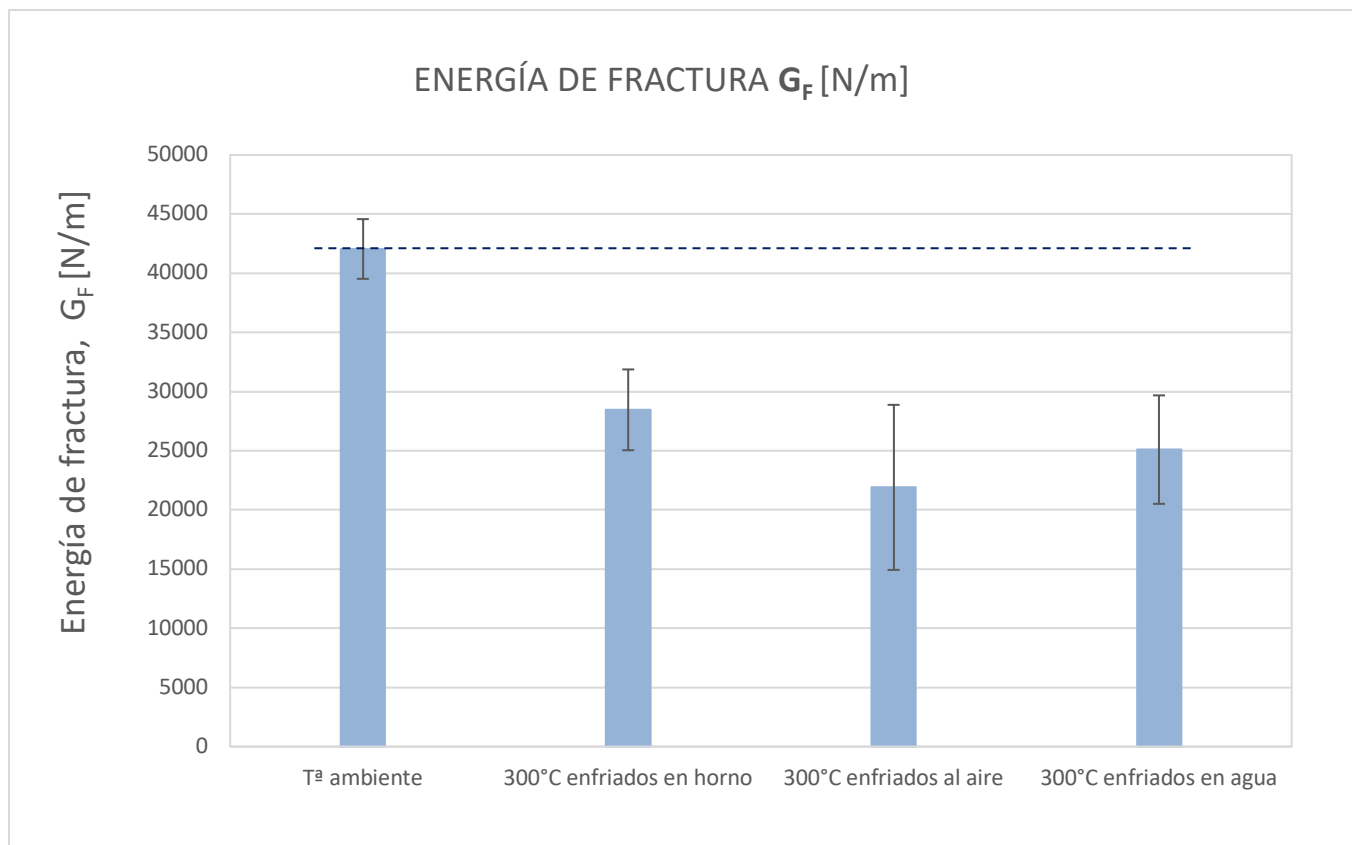


Figura 5.12 Energía de fractura DSLPP.

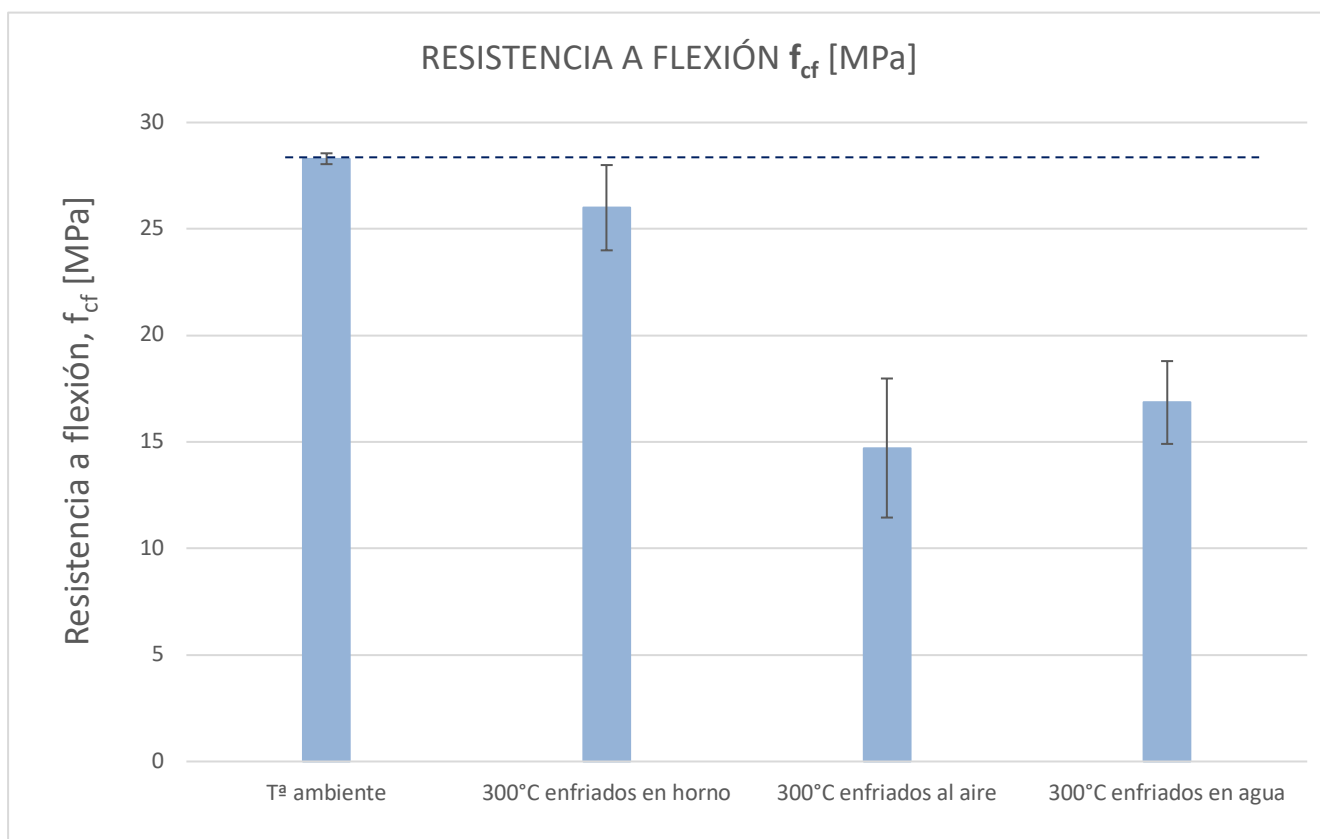


Figura 5.13 Resistencia a flexocompresión DSLPP



## 6 CONCLUSIONES

Tras el análisis llevado a cabo de los resultados de este trabajo con el que se pretendía caracterizar el comportamiento de los hormigones, tanto con fibras de acero y polipropileno como sin ella, frente al impacto térmico, se han extraído las siguientes conclusiones:

- En términos generales el hormigón reforzado con fibras sigue proporcionando mejores prestaciones que el hormigón carente de ellas. En términos relativos, el primero resulta mucho más afectado frente a un choque térmico.
- La resistencia a compresión se ve afectada por el choque térmico, que no por la temperatura, lo que se considera culpa de las presiones internas causadas por el vapor de agua que se genera con un aumento de temperatura y que queda retenido en los poros.
- En el caso del módulo de Young, los nanoporos que aparecen en las matrices de los hormigones tanto D0 como DSLPP a causa de un aumento de temperatura, se ven más afectados por un choque térmico provocado por el aire que por el agua. Es por ello por lo que se deduce que una mayor facilidad para la evacuación del vapor de agua, como es en el aire, genera una deshidratación de la matriz, provocando una menor rigidez.
- Los hormigones sin fibras disminuyen su valor de energía de fractura tras un choque térmico frente al valor que se obtiene al enfriar en el horno, aunque éstos valores siguen siendo más altos que los obtenidos a temperatura ambiente. Como ya se sabía, el aumento de energía de fractura solo se atribuye a una mejora de la ductilidad por la hidratación del cemento, por lo que en el caso del choque térmico se pone de manifiesto que la hidratación es mucho menor debido a la rapidez del proceso.
- Los hormigones con fibras sufren una disminución de la energía de fractura con la temperatura en todos los casos, aunque con el choque térmico es más acusado. La disminución de la energía de fractura en este caso se debe a una reducción en la resistencia a flexotracción principalmente, por lo que se pone de manifiesto que la hidratación de la matriz que aumenta la ductilidad, apenas se produce, en términos relativos, y que el aumento de la porosidad y las presiones internas generados por el vapor de agua que no es evacuado tienen un impacto directo en esta reducción.
- En el caso de los hormigones con fibras, las fibras de polipropileno fundidas proporcionan una mejora en la evacuación del vapor de agua generado, ayudando también a la hidratación del cemento, esto se ve reflejado en la resistencia a compresión tras un choque térmico en aire. En el caso de la energía de fractura, el choque térmico en agua resulta más favorable ya que, aunque la salida del vapor de agua de la matriz sea más dificultosa, ayuda a evitar la propagación del daño y la aparición de microgrietas y por tanto conseguir una resistencia a flexión mayor.

- 
- En el caso de los hormigones sin fibras ocurre lo contrario, la acelerada salida del vapor de agua cuando la probeta se somete a un choque térmico en aire impide en mayor medida la hidratación, por lo que la resistencia a compresión será menor, mientras que en el caso de la energía de fractura el agua impedirá más que el aire la salida del vapor de agua, por lo que las presiones internas en la matriz provocarán un daño mayor en los poros, fomentando la propagación de la grieta, y haciendo que la resistencia a flexotacción sea menor.

## 7 DESARROLLOS FUTUROS

---

Con el fin de profundizar en el estudio del choque térmico en los hormigones de ultra alta resistencia, tras haber obtenido las conclusiones del análisis experimental el cual ha sido el objeto de este proyecto, se proponen una serie posibles tareas de manera que se consiga caracterizar de una forma más precisa tanto las causas del comportamiento, como el propio comportamiento de los hormigones de ultra alta resistencia bajo la situación de choque térmico.

Ya que se ha puesto en evidencia la relación de la porosidad con la temperatura, sería conveniente la realización de ensayos de porosimetría de mercurio, con el que se consiguiera determinar área, volumen y distribución de los poros por de bajo de 40  $\mu\text{m}$ . De igual manera, la realización de pruebas de tomografía computadorizada (TAC) permitirían visualizar la variación de la porosidad de tamaños mayores a las 40  $\mu\text{m}$  en las distintas situaciones, tanto de los hormigones D0 como los DSLPP, ya que este proyecto se ha basado de una manera sustancial en los ensayos de este tipo realizados en otros programas experimentales.

Las pruebas anteriores también serían útiles de manera que se pudiera contrastar la información obtenida en el caso de llevar un control de la pérdida de masa, de manera que se pueda cuantificar la deshidratación producida en el calentamiento, así como la posible rehidratación en el caso de choque térmico en agua.

Resultaría también interesante el estudio del uso de las fibras de polipropileno, caracterizar su comportamiento frente al choque térmico, buscando determinar la dosificación óptima, ya que se concluye que su efecto tiene una gran importancia en la evacuación del vapor de agua de los hormigones con fibra.

Por último, sería muy útil llevar a cabo un mayor número de ensayos, principalmente de los ensayos realizados bajo la situación de choque térmico en agua, ya que son los que más dispersión se ha apreciado, con el fin de obtener resultados que garanticen una mayor fiabilidad.

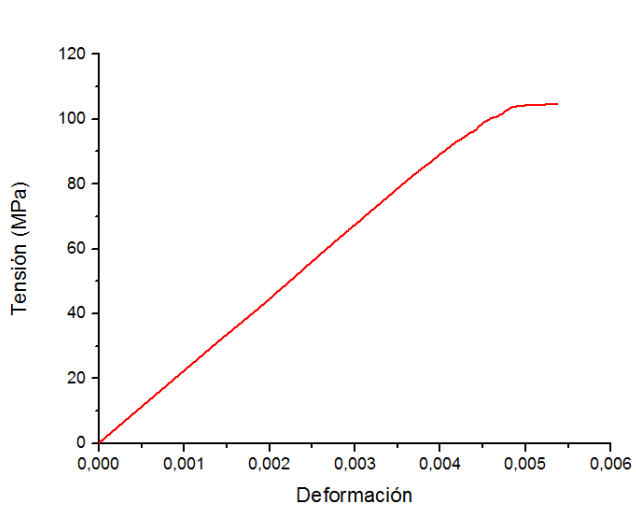




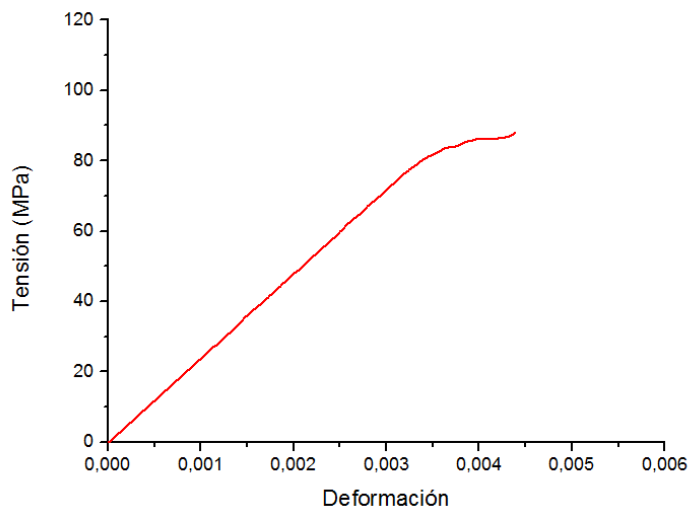
## 8 ANEXO

### 8.1 Curvas ensayo de compresión simple

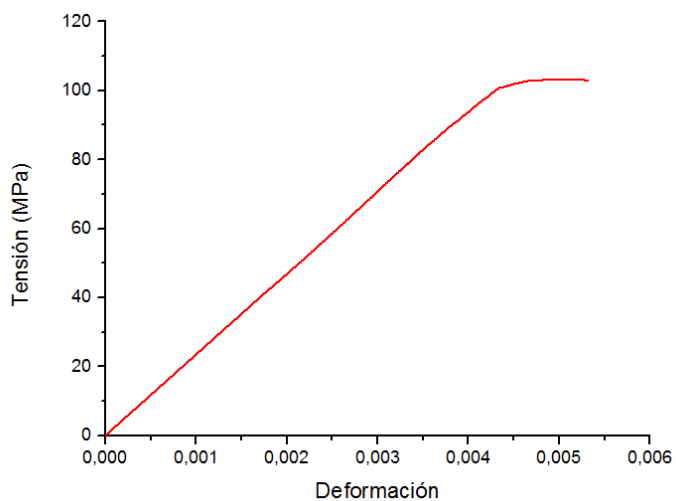
#### 8.1.1 Curvas tension-deformación ( $\sigma - \varepsilon$ ) en probetas D0



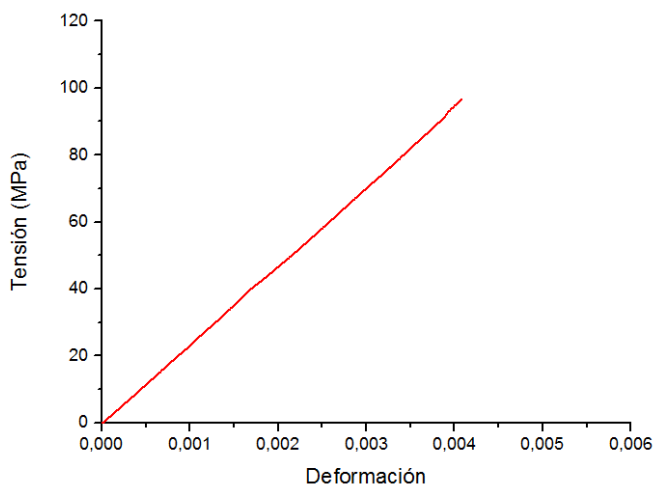
D0\_1\_AIRE



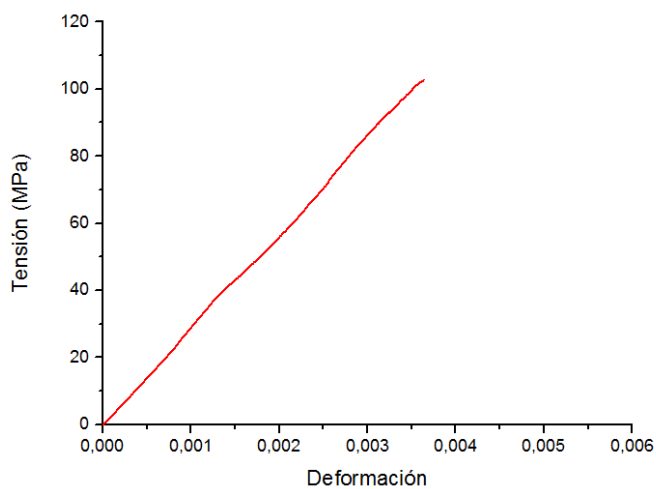
D0\_2\_AIRE



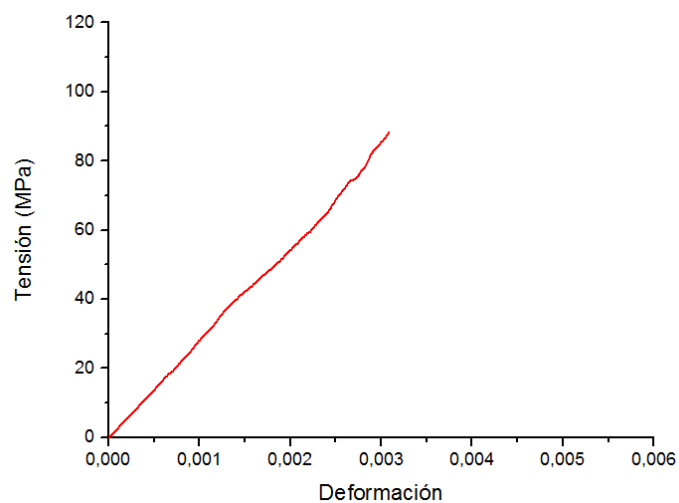
D0\_3\_AIRE



D0\_1\_AGUA

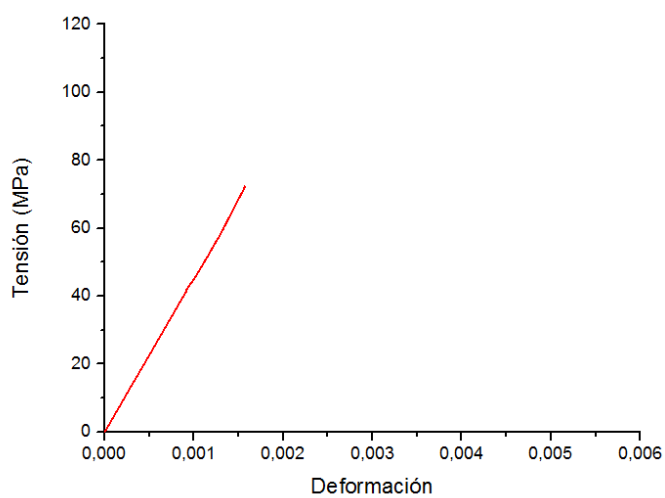


D0\_2\_AGUA

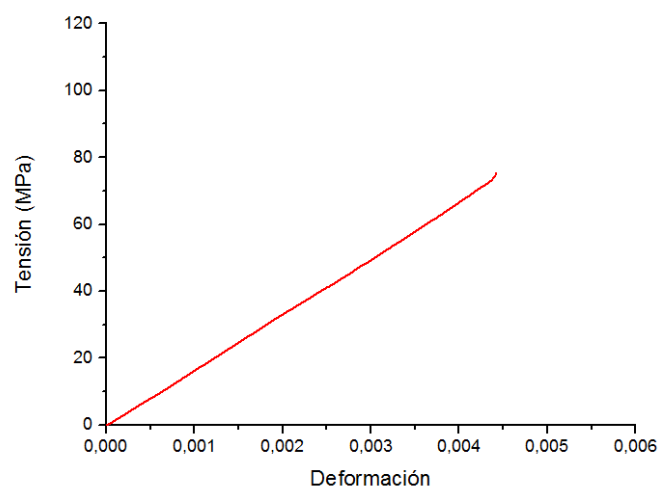


D0\_3\_AGUA

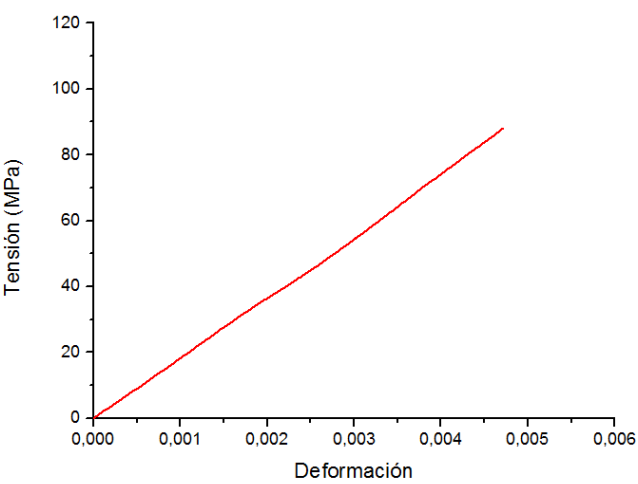
### 8.1.2 Curva tensión-deformación $\sigma - \varepsilon$ en probetas DSLPP



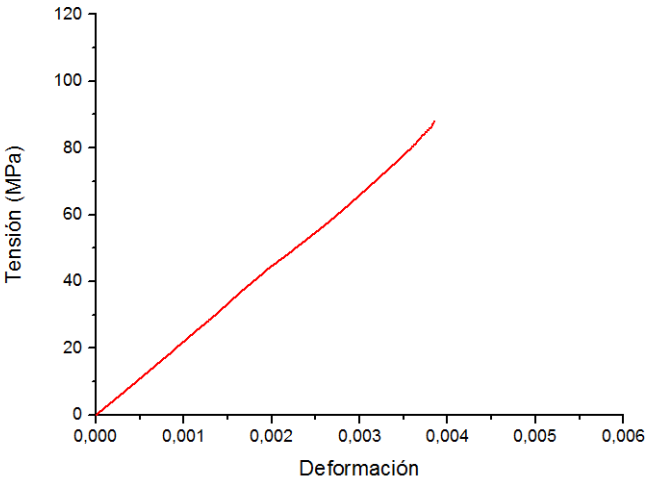
DSLPP\_1\_AIRE\*



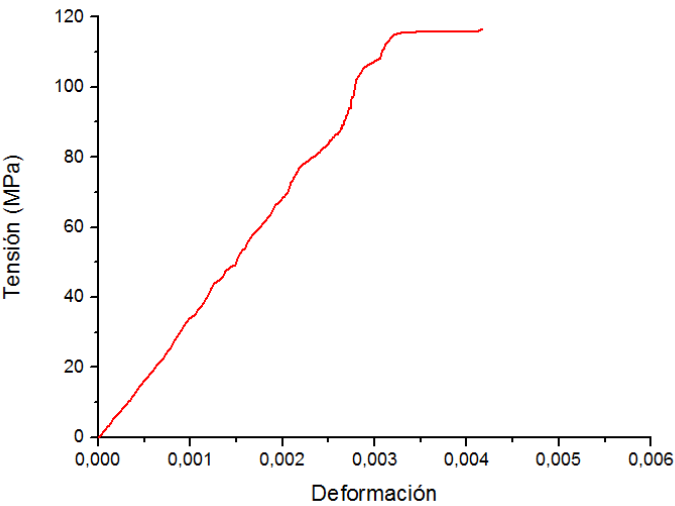
DSLPP\_2\_AIRE



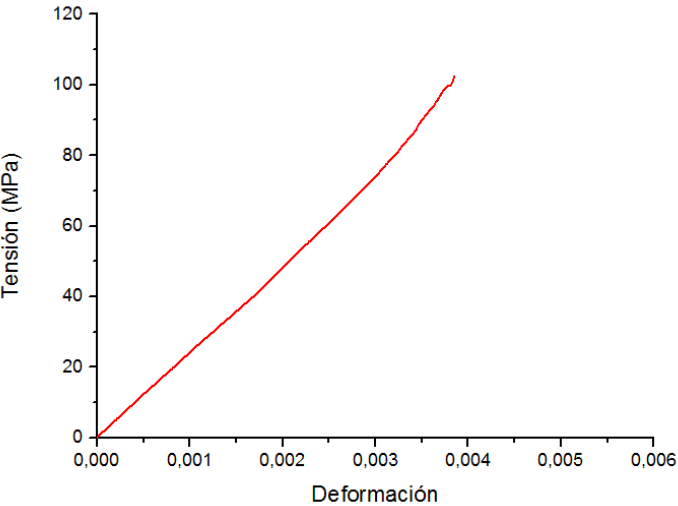
DSLPP\_3\_AIRE



DSLPP\_1\_AGUA



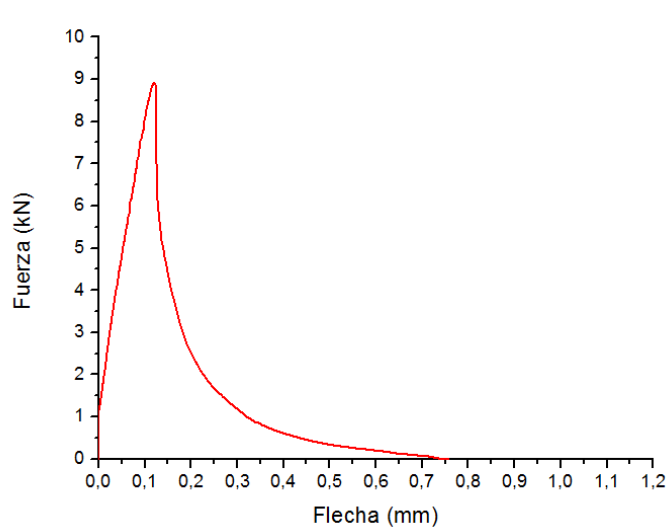
DSLPP\_2\_AGUA



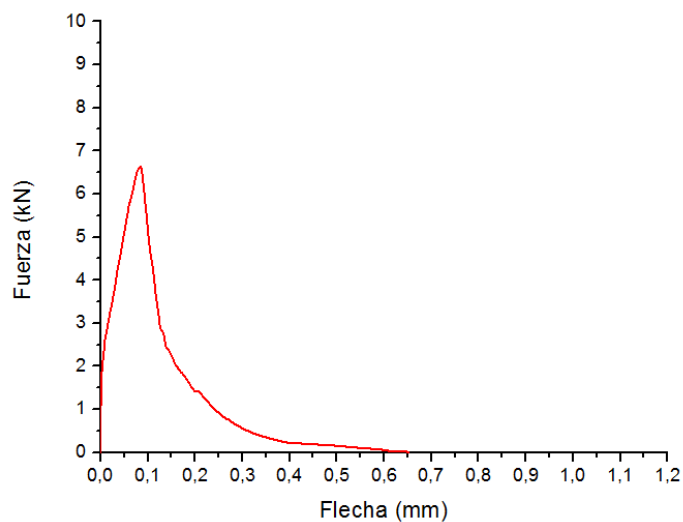
DSLPP\_3\_AGUA

## 8.2 Curvas ensayo de flexion en tres puntos

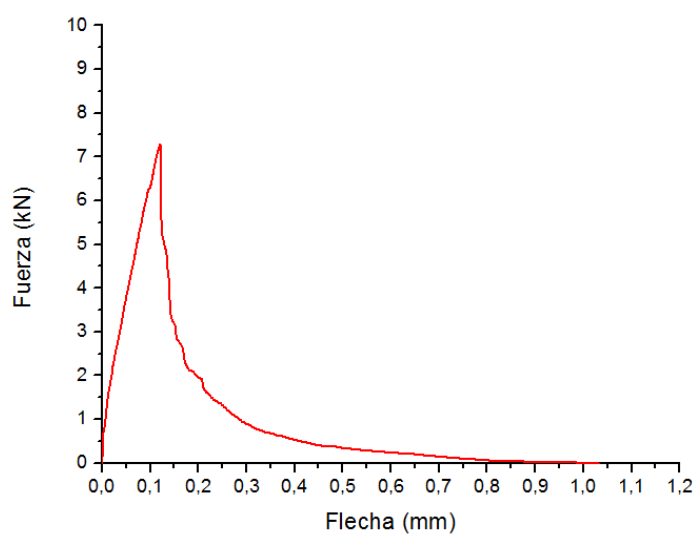
### 8.2.1 Curvas carga-flecha ( $P - \delta$ ) en probetas D0



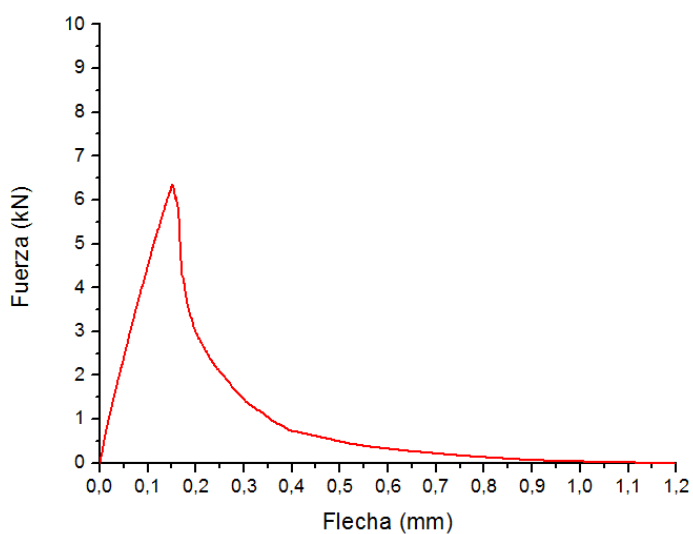
D0\_1\_AIRE



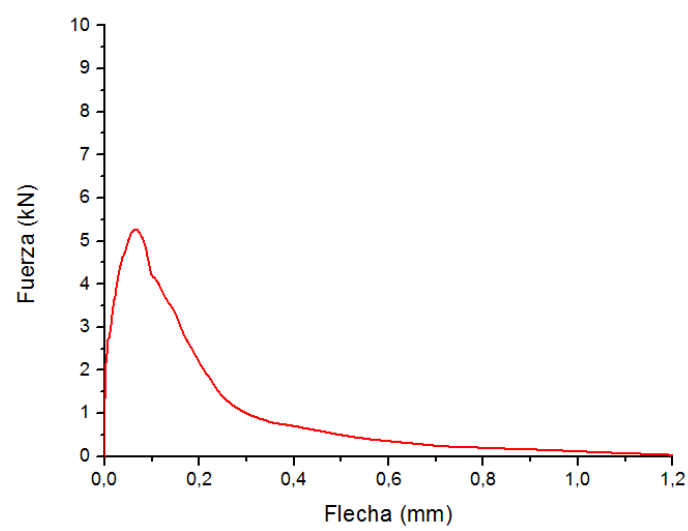
D0\_2\_AIRE



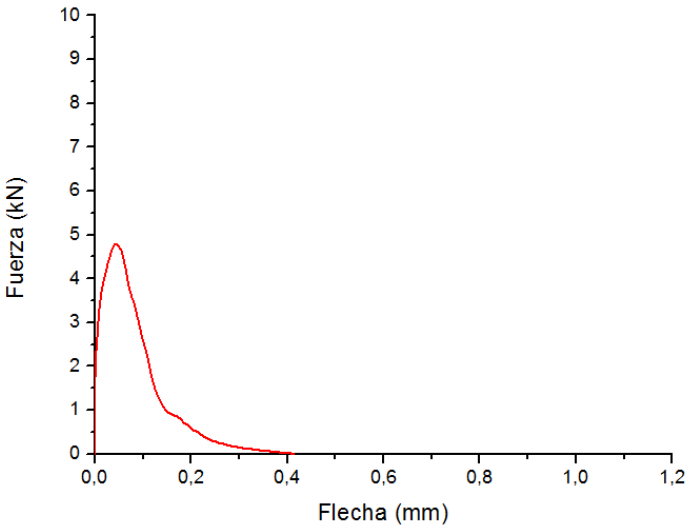
D0\_3\_AIRE



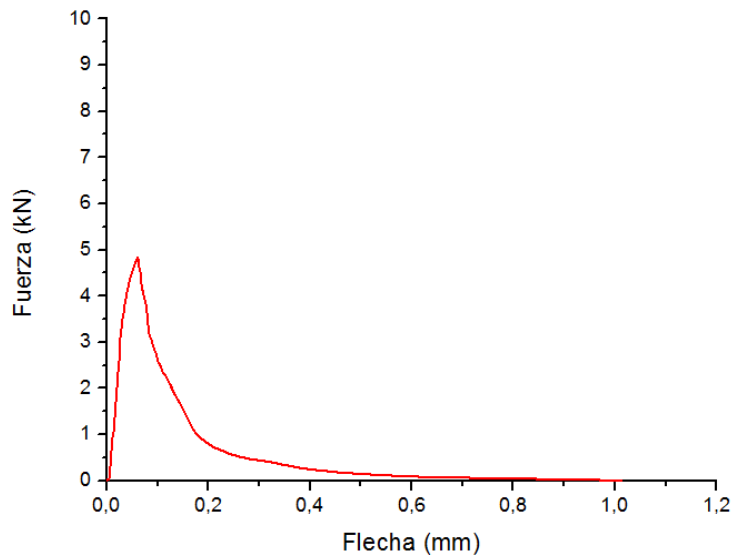
D0\_4\_AIRE



D0\_1\_AGUA

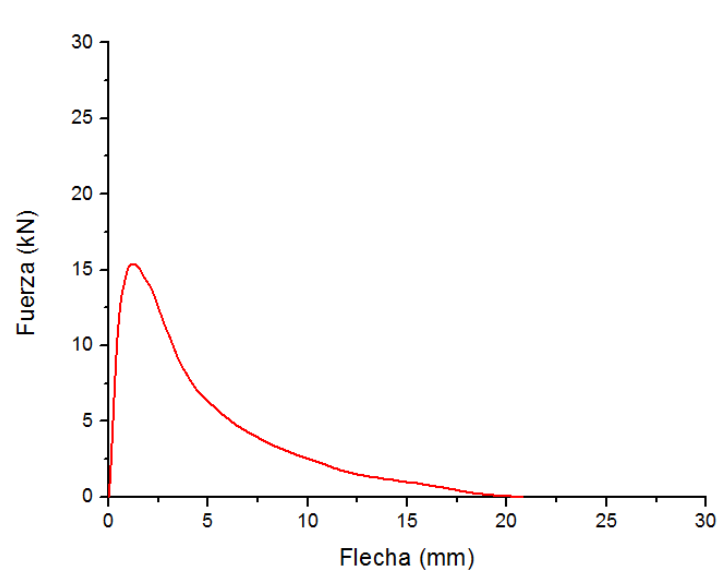


D0\_3\_AGUA

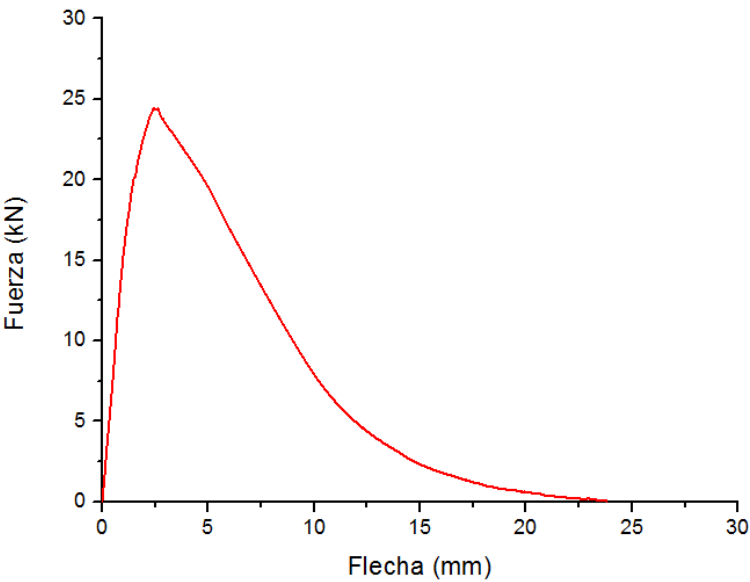


D0\_4\_AGUA

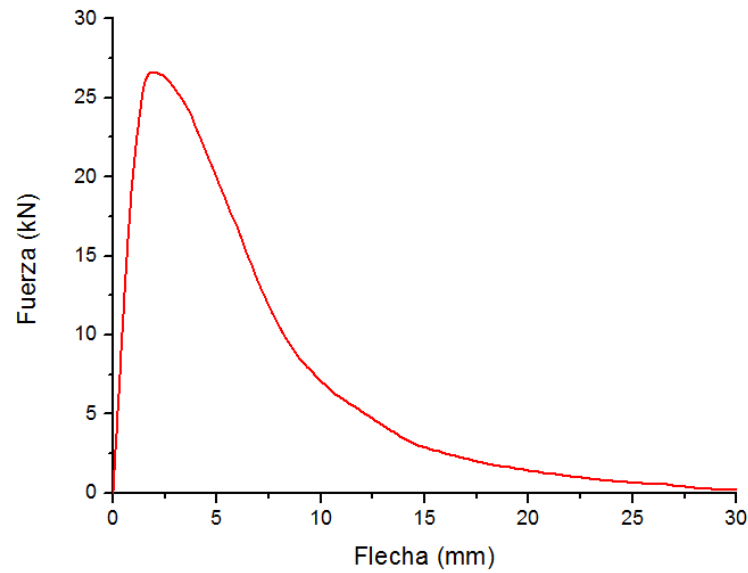
8.2.2 Curvas carga-flecha ( $P - \delta$ ) en probetas DSLPP



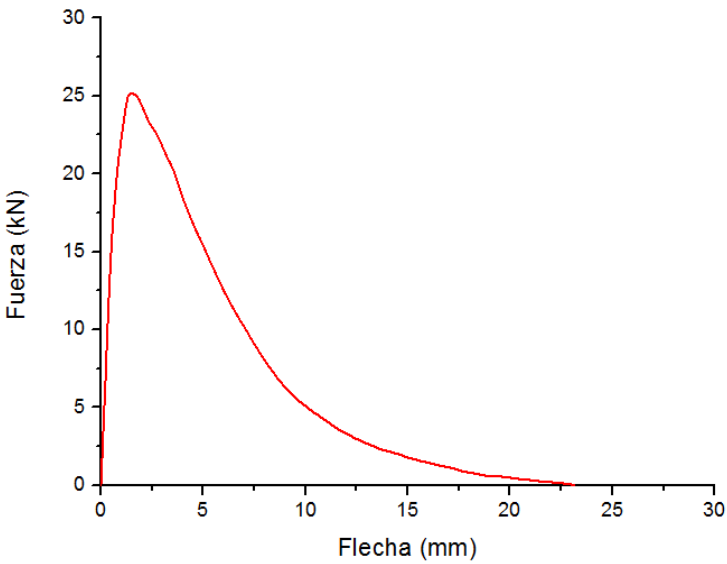
DSLPP\_1\_AIRE



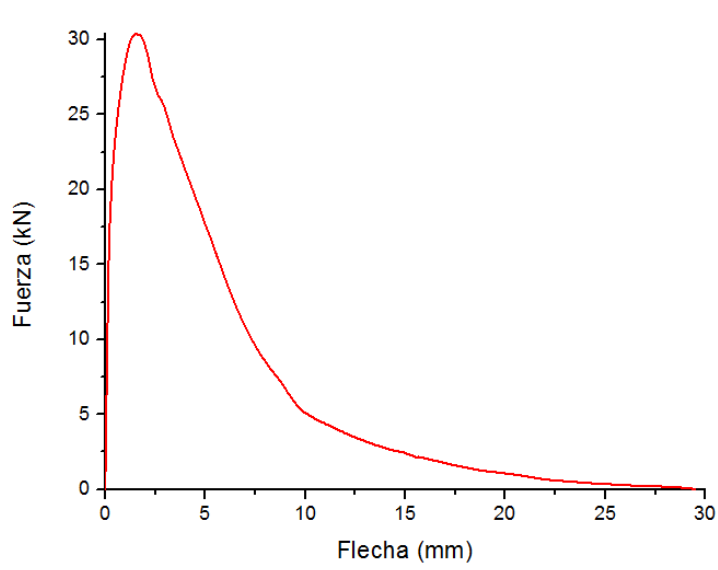
DSLPP\_2\_AIRE



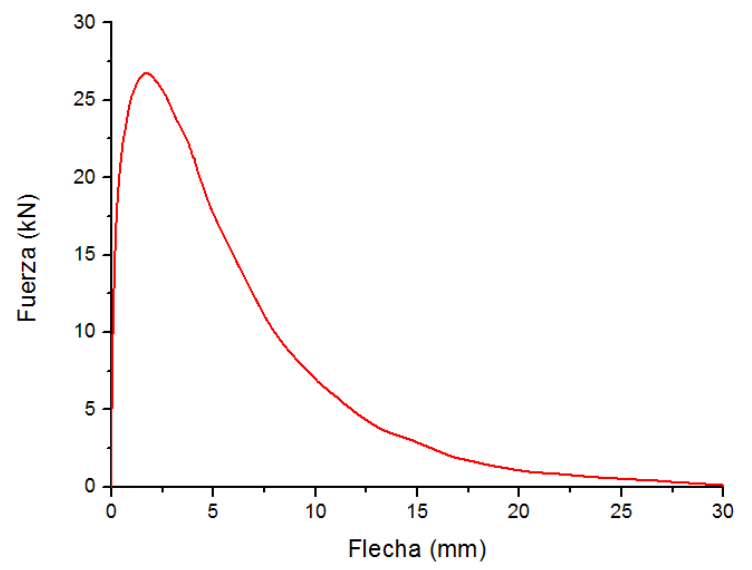
DSLPP\_3\_AIRE



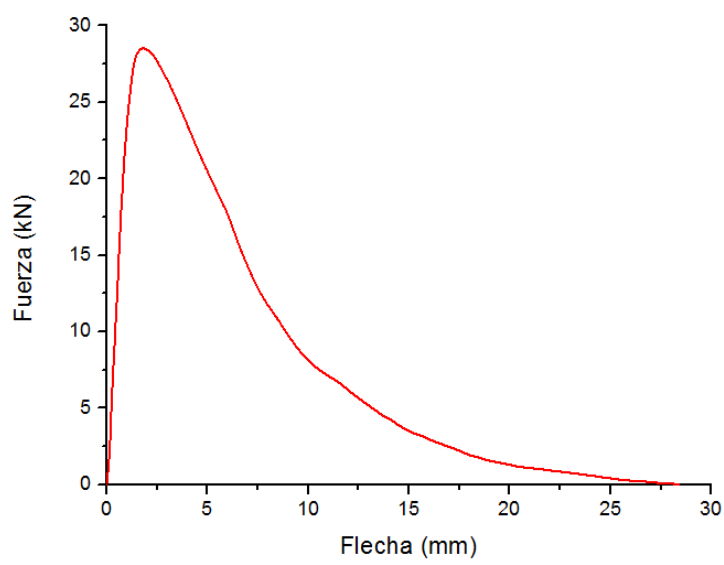
DSLPP\_4\_AIRE



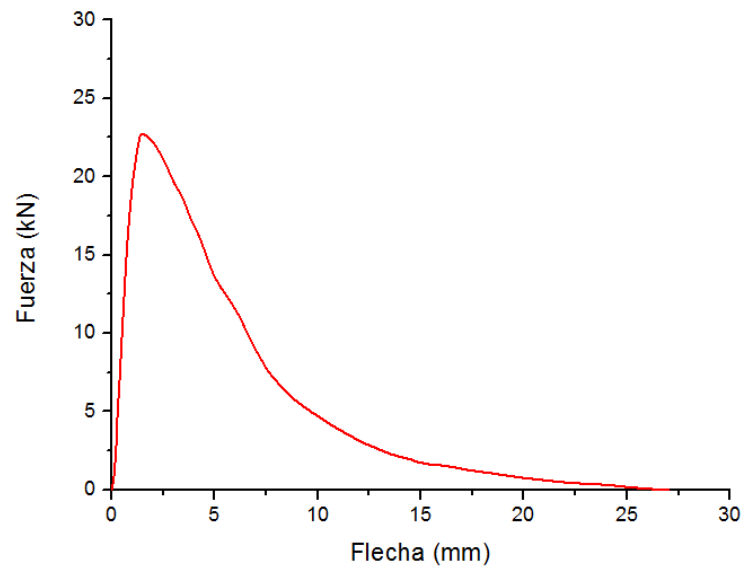
DSLPP\_1\_AGUA



DSLPP\_2\_AGUA



DSLPP\_3\_AGUA



DSLPP\_4\_AGUA





---

## REFERENCIAS

---

- [1] B. Graybeal, "Compressive behaviour of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete," *ACI Mater. J.*, vol. 104, pp. 146–152, 2007.
- [2] K. Wille, A. Naaman, and G. Parra-Montesinos, "Ultra-High performance concrete with compressive strength exceeding 150 MPa (22ksi): a simpler way," *ACI Mater. J.*, vol. 108, pp. 1–11, 2012.
- [3] J. D. Ríos, H. Cifuentes, C. Leiva, and S. Seitzl, "Analysis of the mechanical and fracture behavior of heated ultra-high-performance fiber-reinforced concrete by X-ray computed tomography," *Cem. Concr. Res.*, vol. 119, pp. 77–88, 2019.
- [4] R. Yu, P. Spiez, and H. Brouwers, "Mix design and properties assessment of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC)," *Cem. Concr. Res.*, vol. 56, pp. 29–39, 2014.
- [5] J. D. Ríos, C. Leiva, M. P. Ariza, S. Seitzl, and H. Cifuentes, "Analysis of the tensile fracture properties of ultra-high-strength fiber-reinforced concrete with different types of steel fibers by X-ray tomography," *Mater. Des.*, vol. 165, p. 107582, 2019.
- [6] T. Simoes, H. Costa, D. D. da Costa, and E. Júlio, "Influence of fibres on the mechanical behaviour of fibre reinforced concrete matrixes," *Constr. Build. Mater.*, vol. 137, pp. 548–556, 2017.
- [7] J. P. Hwang, M. Kim, and K. Y. Ann, "Porosity generation arising from steel fibre in concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 94, pp. 433–436, 2015.
- [8] A. H. Akca and N. Özyurt Zihnioglu, "Effects of re-curing on residual mechanical properties of concrete after high temperatures exposure," *Constr. Build. Mater.*, vol. 159, pp. 540–552, 2018.
- [9] W. Zhang, H. Min, X. Gu, Y. Xi, and Y. Xing, "Mesoscale model for thermal conductivity of concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 98, pp. 8–16, 2015.
- [10] A. H. Akca and N. Özyurt Zihnioglu, "High performance concrete under elevated temperatures," *Constr. Build. Mater.*, vol. 44, pp. 317–328, 2013.
- [11] P. Kalifa, F. D. Menneteau, and D. Quenard, "Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures," *Cem. Concr. Res.*, vol. 30, pp. 1915–1927, 2000.
- [12] H. Cifuentes, C. Leiva, F. Medina, and C. Fernández-Pereira, "Effects of fibres and rice

- husk ash on properties of heated HSC,” *Mag. Concr. Res.*, vol. 64, no. 5, pp. 457–470, 2012.
- [13] M. Reda, N. Shrive, and J. Gillott, “Microstructural investigation of innovative UHPC,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 29, pp. 323–329, 1999.
- [14] A. Gómez Casado, “Estudio analítico y experimental de elementos flectados de hormigón de ultra-altas prestaciones armado y pretensado,” Universidad de Sevilla, 2017.
- [15] AENOR, “UNE-EN 14889-1:2008, Fibras para hormigón. Parte 1: Fibras de acero. Definiciones, especificaciones y conformidad,” 2008.
- [16] “EHE-08. Instrucción de hormigón estructural.” 2008.
- [17] A. Naaman, T. Wongtanalitcharoen, and G. Hauser, “Influence of different fibers on plastic shrinkage cracking of concrete,” *ACI Mater. J.*, vol. 102(1), pp. 49–58, 2005.
- [18] AENOR, “UNE-EN 14889-2:2008, Fibras para hormigón. Parte 2: Fibras poliméricas. Definiciones, especificaciones y conformidad.” 2008.
- [19] A. Afán Torrijos, “Análisis experimental del comportamiento de hormigones de ultra-altas prestaciones a temperatura elevada,” Universidad de Sevilla, 2018.
- [20] G. F. Peng, S. H. Bian, Z. Q. Guo, J. Zhao, X. L. Peng, and Y. C. Jiang, “Effect of thermal shock due to rapid cooling on residual mechanical properties of fiber concrete exposed to high temperatures,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 22, no. 5, pp. 948–955, 2008.
- [21] N. Buratti, C. Mazzotti, and M. Savoia, “Post-cracking behaviour of steel and macrosynthetic fibre-reinforced concretes,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, pp. 2713–2722, 2011.
- [22] S. Wang, M. Zhang, and S. Quek, “Mechanical behaviour of fiber-reinforced self-compacting concrete subjected to a high strain rate compressive loading,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 31, pp. 1–11, 2012.
- [23] AENOR, “UNE EN 12390-1/AC:2005, Ensayos de hormigón endurecido. Parte 1: Forma, medidas y otras características de las probetas y moldes.” 2005.
- [24] AENOR, “UNE EN 12390-2:2009, Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia.” 2009.
- [25] AENOR, “UNE EN-12390-3:2009, Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas.” 2009.
- [26] “Realización de análisis experimentales.” [Online]. Available: <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6535/08Capitulo6.pdf?sequence=9&isAllowed=y>. [Accessed: 08-Jul-2019].
- [27] AENOR, “UNE EN-12390-4:2001, Ensayos de hormigón endurecido. Parte 4: Resistencia a compresión. Características de las máquinas de ensayo.” 2001.

- 
- [28] H. Cifuentes Bulté and F. Medina Encina, *Mecánica de la fractura aplicada al hormigón*. Sevilla: Universidad de Sevilla, 2013.
  - [29] AENOR, “UNE EN-12390-5:2009, Ensayos de hormigón endurecido. Parte 5: Resistencia a flexión de probetas.” 2009.
  - [30] “TCM-85 RILEM. Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three points bend test on notched beams.,” *Mater. Struct.*, vol. 18 (4), pp. 287–290, 1984.